

Ville-Veikko Laulainen

# Tietomallikoordinaattorin tehtävät 3D-koneohjatulla infratyömaalla

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Maanmittaustekniikan tutkinto-ohjelma

Insinöörityö

17.3.2015

|  |  |
|--|--|
| Tekijä<br>Otsikko<br><br>Sivumäärä<br>Aika   | Ville-Veikko Laulainen<br>Tietomallikoordinaattorin tehtävät 3D-koneohjatulla infratyö-<br>maalla<br><br>91 sivua + 3 liitettä<br>28.11.2014 |
| Tutkinto   | insinööri (AMK)  |
| Koulutusohjelma  | maanmittaustekniikka   |
| Ohjaajat   | maanmittausinsinööri Janne Harju<br>yliopettaja Vesa Rope  |
| <p>Tämän insinööri työn tarkoituksena on perehdyttää lukija ymmärtämään, mitä kaikkea 3D-koneohjatulla maarakennustyömaalla toimivan tietomallikoordinaattorin työtehtäviin kuuluu.</p> <p>Maarakentamisessa käytettävät koneohjausjärjestelmät ovat koneen kuljettajaa opastavia järjestelmiä, jotka mahdollistavat työtehtävien suorittamisen suunnitelmien mukaisesti ilman erillistä maastoon merkintää. Koneohjausjärjestelmän näytöltä koneen kuljettaja näkee reaaliajassa koneen kauhan tai terän liikkeen suunnitelmaan nähden.</p> <p>Koneohjauksella toteutettu työmaa on huomattavasti kannattavampi urakoitsijan kannalta kuin perinteisillä metodeilla toteutettu työmaa. Tämä perustuu siihen, että koneohjaus vähentää huomattavasti mittaustarvetta ja massamenekkiä. Lisäksi säästöjä kertyy polttoainekustannuksissa, kun työkone kykenee käyttämään koko työaikansa tehokkaaseen työkäyttöön. Koneohjaus ei ole myöskään altis sääolosuhteille, kuten pimeydelle tai sumulle.</p> <p>Koneohjauksen saattaminen toimintakuntoon vaatii monen eri asian osaamista. Koneohjauksesta vastaavan henkilön täytyy ymmärtää mittaustekniikkaa niin satelliittipaikannuksen kuin takymetrimittauksenkin saralta. Koneohjausjärjestelmä vaatii kohdetta oikein kuvaavat mallit toimiakseen. Mallien luominen onkin eräs tietomallikoordinaattorin tärkeimmistä työtehtävistä. Tämän lisäksi tietomallikoordinaattorina toimivan henkilön täytyy ymmärtää ja hallita eri koordinaatistojen merkitys sekä näiden väliset muunnokset.</p> <p>Kokonaan koneohjauksella toteutettua työmaata varten ollaan luomassa omat laatustandardit sekä tarkkuusvaatimukset. Työssä esitellään tässä vaiheessa luonnostasolla olevan esityksen vaikutukset työmaan laatuvalvontaan sekä toleransseihin. Tietomallikoordinaattorin tehtävä on ohjeistaa ja valvoa, että kyseisiä ehtoja noudatetaan rakentamisen aikana.</p> |  |
| Avainsanat   | koneohjaus, tietomalli, tietomallikoordinaattori, mallintaminen  |

|  |   |
|--|---|
| Author<br>Title  | Ville-Veikko Laulainen<br>Work description for information model coordinators on a 3D-machine-controlled construction sites |
| Number of Pages<br>Date  | 91 pages + 3 appendices<br>28 November 2014   |
| Degree   | Bachelor of Engineering   |
| Degree Programme   | Land surveying  |
| Instructors  | Janne Harju, Land Surveyor<br>Vesa Rope, Principal Lecturer   |
| <p>The purpose of this Bachelor's thesis was to introduce the duties of an information model coordinator who works on a machine controlled construction site.</p> <p>The Bachelor's thesis presented the latest news and instructions given in the quality standards, still mainly in draft stage, for construction sites completely built with machine controlled machinery and data models. Furthermore, interviews with the professionals on the field were used, as well as previous Bachelor's theses on this topic.</p> <p>Along with the theoretical information, practical information was also used for the thesis. The correct installation process of the machine control system of excavators was demonstrated, as well as the setting up of the reference station when real time kinetic- based satellite surveying was used.</p> <p>The outcome of the Bachelor's thesis was a complete guide which aids for a person new to this field to figure out the needs and requirements that a machine controlled construction sites requires. As a result, he or she will be able to perform most assignments.</p> |   |
| Keywords   | machine control, information model, information model coordinator, modelling  |

# Sisällys

## Lyhenteet

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 1     | Johdanto  | 1  |
| 2     | Maarakennuksen muutokset  | 1  |
| 2.1   | Maarakentaminen   | 1  |
| 2.2   | Koneohjauksen periaate ja hyödyt  | 3  |
| 2.3   | Tietomalli  | 8  |
| 3     | Satelliittipaikantaminen  | 12 |
| 3.1   | Satelliittipaikannuksen periaate  | 12 |
| 3.2   | Staattinen relatiivinen GNSS-mittaus  | 13 |
| 3.3   | RTK-paikannus   | 16 |
| 3.4   | Verkko-RTK-mittaaminen  | 18 |
| 3.5   | Topconin MmGPS-paikannusjärjestelmä   | 22 |
| 4     | Paikantaminen takymetrin avulla   | 24 |
| 4.1   | Takymetrin toiminta- ja käyttöperiaate  | 24 |
| 4.2   | Takymetrin käyttäminen koneohjausjärjestelmän paikannuksessa                                | 26 |
| 5     | Työmaalla varsinaista rakentamista edeltävät työtehtävät                                    | 27 |
| 5.1   | Suunnitelma-aineiston mallintaminen koneohjausjärjestelmiin sopiviksi                       | 27 |
| 5.1.1 | Esimerkki pintamallin luomisesta paperisuunnitelmien pohjalta                               | 31 |
| 5.1.2 | Eri laitevalmistajien formaateista  | 36 |
| 5.2   | Koordinaatistot ja muunnokset   | 38 |
| 5.2.1 | Koordinaattijärjestelmät  | 38 |
| 5.2.2 | Korkeusjärjestelmät   | 42 |
| 5.2.3 | Paikallisen muunnoksen tekeminen 3D-Officella   | 43 |
| 5.3   | Tukiasema suunnittelu ja toteuttaminen  | 47 |
| 5.3.1 | Yhden tai useamman tukiaseman ratkaisu  | 47 |
| 5.3.2 | Tukiaseman pystyttäminen  | 49 |
| 5.4   | Koneenkuljettajien ja mittaushenkilöstön kouluttaminen yhtenäiseen toimintatapaan työmaalla | 52 |
| 6     | Koneohjausjärjestelmän asennus ja kalibrointi   | 53 |
| 6.1   | Topcon X63i- koneohjausjärjestelmä  | 54 |

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 6.2   | Topcon X63i:n asentaminen kaivinkoneeseen  | 55 |
| 6.3   | Järjestelmän kalibroiminen   | 67 |
| 7     | Työmaan rakentamisen aikaiset työtehtävät  | 74 |
| 7.1   | Tietomallikoordinaattorin toimenkuva rakentamisen aikana                                   | 74 |
| 7.2   | Laadunvarmistaminen  | 75 |
| 7.2.1 | Toteutusmallin oikeellisuuden varmistamiseen   | 78 |
| 7.2.2 | Työkoneautomaatiojärjestelmän ja GNSS-tukiaseman tarkkuuden seuranta ja dokumentointi      | 79 |
| 7.2.3 | Työkoneautomaatiojärjestelmällä tehtävä toteumamittaus ja muu työn aikainen laadunvalvonta | 80 |
| 7.2.4 | Mittaushenkilöstön suorittama tarkemittaus   | 82 |
| 7.2.5 | Dokumentointi  | 84 |
| 8     | Työmaan rakentamisen lopettamisen aikaiset työtehtävät                                     | 84 |
| 9     | Pohdinta   | 86 |
| 9.1   | Työn tarkoitus ja havainnot  | 86 |
| 9.2   | Työn tekijän arvio koneohjauksen sisällyttämisestä tulevaisuuden opetussuunnitelmaan.      | 86 |
|       | Lähteet  | 88 |
|       | Liitteet   |    |
|       | Liite 1. JHS 184 -standardin ohjeistus staattiselle relatiiviselle GNSS-mittaukselle       |    |
|       | Liite 2. Koneohjauksen paikannustarkkuuden seurantalomake                                  |    |
|       | Liite 3. N60- ja N2000-korkeusjärjestelmien välinen korkeusero Suomessa                    |    |

## Lyhenteet ja käsitteet

|             |   |
|-------------|---|
| Attribuutti | Ominaisuustieto, jolla kuvataan kohteen ominaisuuksia.  |
| BIM         | Building Information Model. Englanninkielinen lyhenne tietomallille.  |
| CAD         | Computer-Aided Design. Tietokoneavusteinen suunnittelu.   |
| Ellipsoidi  | Matemaattinen malli, joka sovitetaan maapallon pinnanmuotoihin.   |
| Geoidi      | Maapallon painovoimakentän tasa-arvopinta, joka kuvaa pintaa johon keskimerenpinnan korkeus asettuisi kussakin kohtaa maapalloa lepotilassa.  |
| Glonass     | Globalnaja navigatsionnaja sputnikovaja sistema. Neuvostoliiton alulle panema, Venäjän puolustusministeriön ylläpitämä ja rahoittama satelliittipaikannusjärjestelmä.   |
| GNSS        | Global Navigation Satellite System. Maailmanlaajuinen satelliittipaikannusjärjestelmä, jonka osajärjestelminä toimivat tällä hetkellä yhdysvaltalainen GPS ja venäläinen Glonass. Lisäksi järjestelmässä on valmiudet ottaa käyttöön myös eurooppalainen Galileo ja kiinalainen Compass näiden saavutettua toimintavalmius. |
| GPS         | Global Positioning System. Yhdysvaltojen puolustusministeriön rahoittama ja kehittämä satelliittipaikannusjärjestelmä, joka tuli ensimmäisenä paikannusjärjestelmänä yleiseen siviilikäyttöön.  |
| IMU         | Inertial Measurement Unit. Inertianmittausalusta, jonka avulla tietokoneen laskentayksikkö kykenee mallintamaan esimerkiksi kaivinkoneen puomin liikkeit koneohjausjärjestelmissä.  |
| InfraFINBIM | Hanke, joka ajaa tietomallipohjaisen suunnittelun ja rakentamisen käyttöönottoa maanrakennuksessa.  |

|     |   |
|-----|---|
| RTK | Real Time Kinematic. Satelliittimittausmetodi, jossa tunnetun aseman avulla korjataan vastaanottiin saapuvaa signaalia, jolloin saavutetaan senttimetrin tarkkuus.  |
| TSV | Tasausviiva. Tasausviivoilla kuvataan suunnitelmissa viimeiseksi rakennettavan valmiin pinnan sijaintia ja korkeusasemaa.   |
| VRS | Virtual Reference Station. RTK-mittaamisen erikoissovellus, jossa mittausajan läheisyyteen luodaan virtuaalinen tukiasema, joka vastaanottaa korjaustietonsa järjestelmän lähimmältä kiinteältä tukiasemalta. |

## 1 Johdanto

Koneohjausjärjestelmien käyttö kotimaisen maarakentamisen apuna on yhä yleistynyt trendi. Järjestelmien käyttökuntoon saattaminen vaatii monenlaista osaamista, jota perinteisten koneen kuljettajien ja mittaushenkilöstön joukosta ei välttämättä löydy. Tämän vuoksi tietomalli- tai koneohjausoperaattori-nimellä työskenteleville koneohjauksen asiantuntijoille on tulevaisuudessa kova kysyntä työmarkkinoilla.

Tässä työssä pyritään esittelemään mahdollisimman kokonaisvaltaisesti niitä taitoja ja työtehtäviä, joita edellä mainitussa tehtävässä työskentelevä henkilö tarvitsee. Työssä käsitellään kaivinkonejärjestelmää sen ollessa ylivoimaisesti yleisin koneohjaustyyppi. Koneohjausjärjestelmän toimintaa esitellään aina teoreettiselta tasolta itse käytännön asennukseen sekä mallien tekemiseen. Lopuksi työssä käsitellään vielä tällä hetkellä luonnosvaiheessa olevia laatustandardeja sekä ohjeistuksia, jotka koskevat koneohjauksella toteutettuja työmaita.

## 2 Maarakennuksen muutokset

### 2.1 Maarakentaminen

Maarakentaminen käsitteenä tarkoittaa kaikkia rakentamiseen liittyviä työsuoritteita, joissa esiintyy maansiirtämistä, louhintaa, aluskasvillisuuden poistamista tai viherrakentamista. Maarakentamista voidaan täten sanoa tapahtuvan joko suuremmassa tai pienemmässä mittakaavassa aina silloin, kun rakennetaan jotain. Erityisen tärkeässä roolissa maarakentaminen on, kun puhutaan infrastruktuurihankkeista, joita ovat mm. tie-, rautatie-, kunnallistekniikka- ja satamarakentamisen hankkeet. Tämän lisäksi talorakentamisen puolella maarakentamiseksi luettavia työtehtäviä ovat talon pohjarakenteiden ja perustusten tekeminen. [1; 2.]

Maarakennustyömaat rakennetaan käytännössä aina tarkkojen suunnitelmien pohjalta. Ennen tietokoneiden tulemistä laajemmalti käyttöön, suunnitelmat ovat olleet paperille piirrettyjä 2D-malleja, joissa on mm. pituus- ja poikkileikkausten, mittapiirustusten sekä



asema- ja rakennekuvien avulla pyritty esittämään rakennettava kohde mahdollisimman yksiselitteisesti. 1990-luvulla tietotekniikan kehittymisen myötä suunnittelijat ovat siirtyneet luomaan suunnitelmakuvat tietokoneilla, yleisimmin erilaisilla CAD-ohjelmistoilla. Digitaaliset suunnitelmat ovat noudattaneet paperisuunnitelmien periaatteita siinä, miten työmaa on kuvattu erilaisten pituus- ja poikkileikkausten ym. avulla. Digitaalisten suunnitelmien etuina ovat olleet helppo siirrettävyys henkilöltä toiselle sekä paperikuvia huomattavasti helpompi muokattavuus, jos suunnitelmassa on tarvinnut tehdä muutoksia. Lisäksi mittausdatan tekeminen digitaalisista suunnitelmista suoraan mittaushenkilöstön käyttöön on tapahtunut helpommin kuin paperisilta suunnitelmakuvilta. Tämän lisäksi digitaalisissa suunnitelmissa eri rakenteita kuvaavat viivat ja elementit ovat yleensä nimetty johdonmukaisesti, jolloin kokemattomankin käyttäjän on helppo tarkastaa, mitä rakennetta tai kohdetta kukin viiva tai symboli tarkoittaa joko suoraan objektin nimestä tai koodikentästä. [2; 3.]

Suunnitelmien maastoon siirtämisessä on mittaushenkilöstöllä ollut erittäin keskeinen osa. Mittaushenkilöstö pystyy poimimaan digitaalisilta suunnitelmakuvilta haluamansa tiedot lähtöaineiston tarkastamisen jälkeen suoraan tallentimelle, jonka pohjalta mittaus tapahtuu. Lisäksi joissakin tapauksissa mittaushenkilöstö mittaa ja tulkitsee yhä paperisilta suunnitelmakuvilta eri rakenteiden etäisyyksiä toisistaan ja suorittaa mittauksen näiden tietojen pohjalta. Tehtävästä riippuen itse mittaus on suoritettu käyttäen hyväksi joko satelliittipaikannusta, takymetrimittausta tai tasolaseria.

Maarakentaminen on tällä hetkellä muutosten keskellä. Suomen maarakentamisessa käytetään yhä enemmissä määrin koneohjausjärjestelmällä varustettuja työkoneita. Etenkin isoilla maarakennushankkeilla työkonemaatiovalmius työkoneissa on jo valintakriteerinä aliurakoitsijoita valittaessa. Työkonemaatiosuorituksen perusteena on rakennussuunnitelmien lukemien suoraan työkonemaatiosuoritusjärjestelmään, jolloin koneen kuljettaja kykenee työskentelemään ilman mittaushenkilöstön suorittamaa maastoon merkintää. Kun aikaa vievää maastoon merkintää ei enää tarvitse suorittaa, voidaan työkoneilla aloittaa kerrosten rakentaminen heti tarpeen vaatiessa, ilman turhia odotuksia. Tällöin kyetään säästämään suoraan urakan kokonaiskustannuksissa vähentyneen mittausarpeen ja turhan seisokkiajan puitteissa. Lisäksi koneohjauksella varustetut työkoneet kykenevät tekemään paljon tasalaatuisempaa työtä, kuin perinteisellä maastoon merkinnällä rakennettaessa. Tällöin myös rakennusmateriaaleja tulee säästymään huomattavasti, kun eri rakennekerroksia ei kaiveta ylisyviksi. [3; 4.]

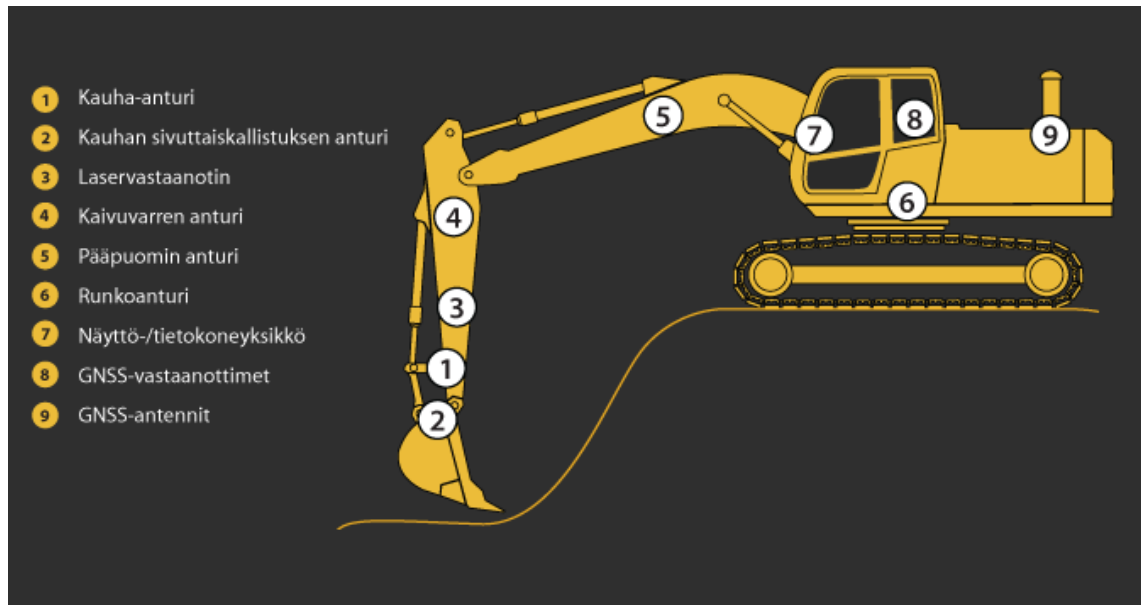
## 2.2 Koneohjauksen periaate ja hyödyt

Koneohjausjärjestelmistä puhuttaessa voidaan eri järjestelmät jakaa useaan eri alalohkoon toimintatapansa perusteella. Yleisesti ensimmäinen jako tehdään 2- ja 3D-järjestelmien välille, jossa luonnollisesti 2D-järjestelmästä puhuttaessa simulointi tapahtuu tasokoordinaatistossa, 3D-järjestelmän ottaessa huomioon tämän lisäksi myös korkeuden. Koneohjausjärjestelmät voidaan jakaa myös niin sanottuihin opastaviin sekä puoli- ja täysin automaattisiin ohjausjärjestelmiin. Täysin automaattisia järjestelmiä ei esiinny varsinaisen rakentamisen piirissä, vaan kyseisen jaon ohjausjärjestelmät vaativat tehdasympäristön tuotantolinjoinen toimiakseen oikein. Opastavat järjestelmät ovat yleisimpiä rakennustyömaiden työkoneautomaatiosta puhuttaessa, hyvänä esimerkkinä opastavasta työkonejärjestelmästä on kaivinkoneen ohjausjärjestelmä. Tämän lisäksi rakentamisessa esiintyy puoliautomaattisia ohjausjärjestelmiä, kuten esim. tiehöylän ohjausjärjestelmä, joka liikuttaa höylän terän korkeutta ja kallistusta automaattisesti suhteessa suunnitelmaan. [5]

Maarakennuksessa käytettävät koneohjausjärjestelmät on tarkoitettu työkoneen kuljettajan apuvälineiksi. Ohjausjärjestelmä ei siis automaattisesti kontrolloi kaikkia koneen liikkeitä, vaan koneen kuljettaja suorittaa työtehtävänsä seuraamalla koneohjausjärjestelmän näytöltä koneen liikkeitä suhteessa suunnitelmasta tehtyyn malliin. Kaikki kuljettajan tarvitsema tieto suunnitelmasta esitetään ohjausjärjestelmän näytöllä, jolloin etukäteen tehtävää maastomerkintää ei enää tarvitse suorittaa. Tämä tarkoittaa myös sitä, että kuljettajan ei tarvitse myöskään käyttää tehokasta työaikaansa nousemalla ulos koneesta tarkastelemaan tekemäänsä työljälkeä sihtilappujen ja tasolaserin avulla. Jotta tämä olisi ylipäättään mahdollista, on työkoneen sijainti ja sen oleellisten liikkuvien osien liikkeet oltava selvillä. [3; 4; 5; 6; 7.]

Työkoneautomaation paikantamisesta puhuttaessa voidaan prosessi jakaa kolmeen osaan, ulkoiseen ja sisäiseen orientointiin sekä itse ohjausjärjestelmän laskentayksikköön. Ulkoisen orientoinnin tarkoituksena on selvittää työkoneen sijainti jonkin koordinaattijärjestelmän koordinaatistossa, jonka jälkeen sisäisessä orientoinnissa määritetään koneen oleellisten osien dimensiot ja liikkeet suhteessa ulkoisessa orientoinnissa määritettyyn pisteeseen. Lopuksi ohjausjärjestelmän oma laskentayksikkö määrittää saamiensa tietojen perusteella joko koneen kauhan tai terän sijainnin sekä koordinaatistoon että suunnitelmaan nähden. [5]

Koneohjausjärjestelmän ulkoinen orientointi suoritetaan joko satelliittipaikantamista tai takymetri mittaamista hyödyntäen. Käytettävä paikannusmenetelmä riippuu koneohjauksella varustetun työkonteen työjäljen vaatimista toleransseista. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että tiehöylät ym. työkonet, joiden työstämän pinnan korkeustoleranssit ovat luokkaa  $\pm 2$  senttimetriä, käyttävät takymetria paikkansa määrittämiseen, kun taas kaivinkoneiden ym. karkeamman toleranssin maansiirtokoneiden paikantaminen voidaan hoitaa joustavasti satelliittivastaanottimilla. Paikannusjärjestelmät sijoitetaan työkonetissa sellaiseen paikkaan, jossa niiden vaurioituminen on epätodennäköistä, näkävyyden ollessa hyvä jokaiseen suuntaan. Esimerkiksi kaivinkoneissa on hyväksi GNSS-antennien sijainniksi havaittu koneen takana sijaitsevan moottoritilan päällinen (kuva 1). [4; 5.]



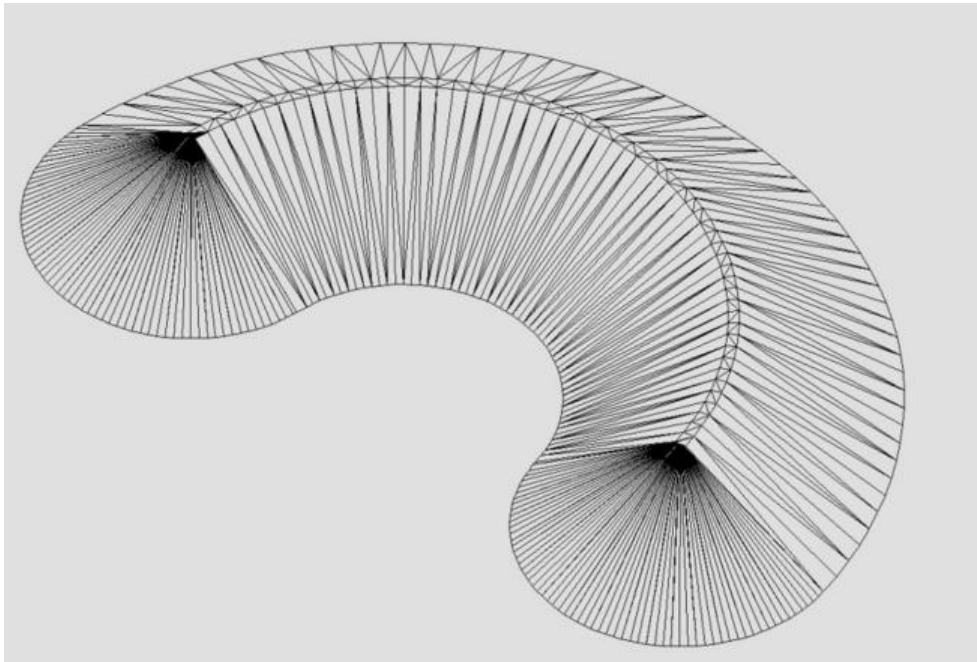
Kuva 1. Kaivinkoneen komponentit Novatronin järjestelmässä [36].

Ulkoinen orientoinnin lisäksi koneohjauksella varustettu työkonet tarvitsee ns. sisäisen orientoinnin toimiakseen oikein. Sisäisen orientoinnin tarkoituksena on kertoa ohjausjärjestelmälle työkonteen oleellisten osien liikkeet ja dimensiot. Järjestelmän keskeisinä komponentteina toimivat IMU-yksiköt eli inertianmittausalustat. Inertianmittausalustojen tehtävä on havaita koneen liikkeiden aiheuttamat kiihtyvyyksien muutokset, joiden perusteella ohjausjärjestelmän tietokone kykenee mallintamaan koneen liikkuvien osien liikkeet järjestelmään. Inertianmittausalustat kiinnitetään työkonetissa jokaiseen sellaiseen osaan, jonka liikkumisella ja asennolla on merkitystä tuotetun työjäljen kanssa. Esimerkiksi kaivinkoneissa tällaisia komponentteja ovat koneen runkoanturi sekä pää-

puomin, kaivuvarren ja kauhan anturit. Runkoanturin tehtävä on mallintaa koneen rungon pituus- ja sivuttaissuuntaiset kallistumiset jotka johtuvat maaston epätasaisuudesta. Pääpuomin ja kaivuvarren antureiden tärkein tehtävä puolestaan on mallintaa puomin liikkeet oikein, ja luonnollisesti kauhan anturin tehtävä on mallintaa kauhan liikkeet. Tämän lisäksi mikäli kaivinkone on varustettu kauhan sivuttaiskallistamisen mahdollistavalla hydraulisella nivelellä, on siinä oltava tapahtuvaa sivuttaiskallistusta mittaava anturi. Viimeksi mainittu anturi ei kuitenkaan ole välttämätön, sillä kaivinkonetta voidaan käyttää myös ilman kyseistä anturia, jolloin työjälkeä tarkastettaessa on kauhan oltava vain kohtisuorassa kaivuvarren kanssa. [4; 5; 6.]

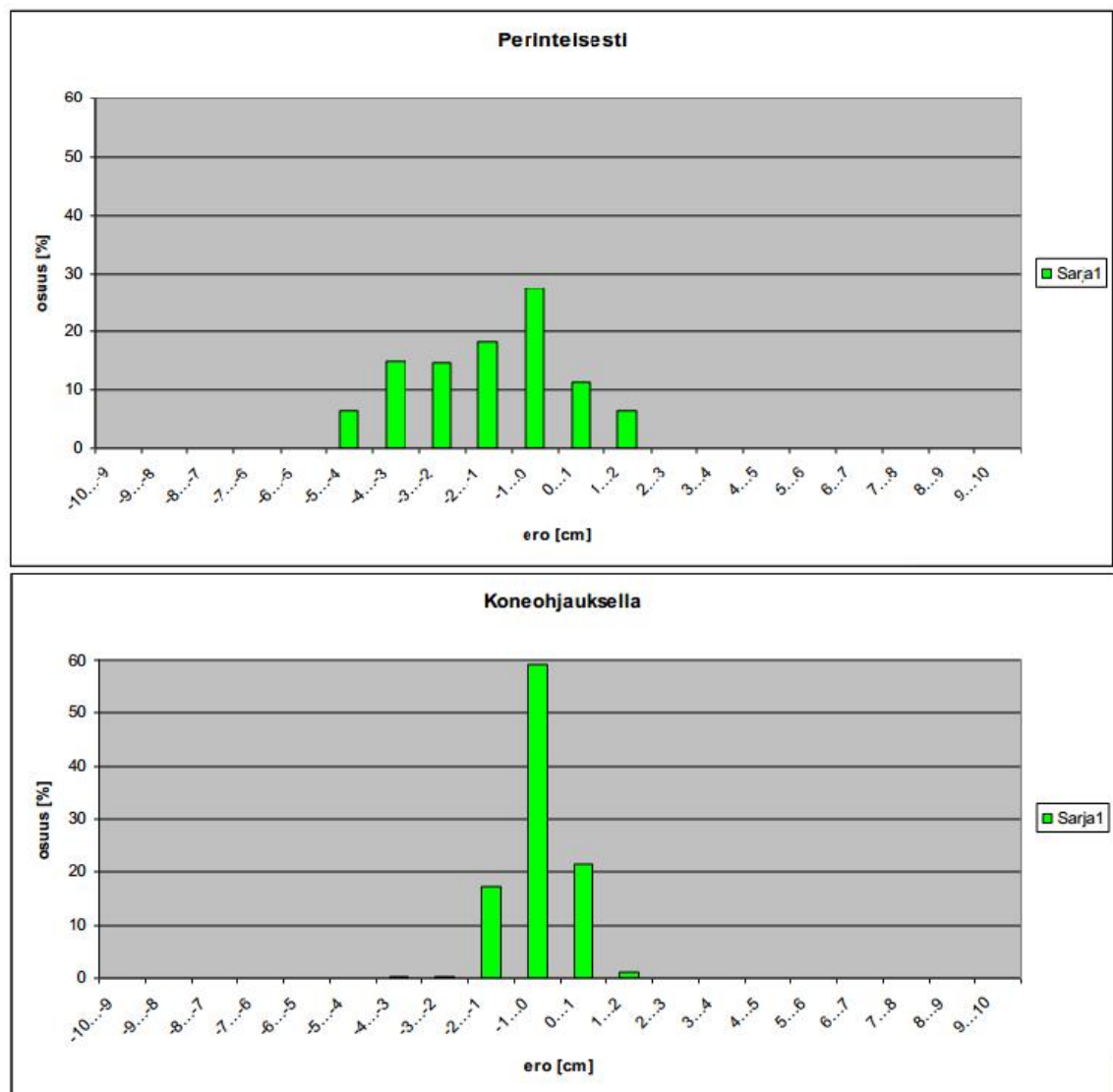
Puomien ja rungon liikkeiden mallintamisen lisäksi järjestelmän tulee tietää koneen oleelliset mitat, jotta ohjausjärjestelmän tietokone pystyy laskemaan esim. kauhan tai terän jokaisen nurkkapisteen koordinaatit. Kaivinkoneen tapauksessa tämä tarkoittaa sitä, että ohjausjärjestelmään syötetään kaikkien puomien pituudet, sekä satelliittipaikannusantennien poikkeamat puomien keskilinjasta ja kiinnityskohdasta. [4; 5.] Toimenpide on esitetty tarkemmin luvussa 6.

Koneohjausjärjestelmien hyväksikäyttämisestä maarakennustyömailla on useita hyötyjä perinteiseen rakentamiseen verrattuna. Kuten jo edellä mainittiin, mikäli työmaalla on käytössä koneohjauksella varustetut työkoneet, ei maastoon merkintää välttämättä tarvitse enää suorittaa. Tämä vapauttaa huomattavasti mittaushenkilöstöltä ennen kuluneita resursseja muihin tehtäviin työmaalla, sekä mahdollistaa ennen hyvin vaikeasti maastoon merkittävien kohteiden rakentamisen oikein suunnitelmat mukaisesti (kuva 2). [2; 4; 5.]



Kuva 2. Valli, jonka maastoon merkintä perinteisillä metodeilla on hyvin haasteellista [5].

Koneohjausjärjestelmällä varustettu työkone ei myöskään ole yhtä altis säätilojen ja vuorokauden aikojen aiheuttamille haitoille, vaan pystyvät tarvittaessa tekemään töitä tehokkaasti niin sateisissa, sumuisissa kuin täysin pimeissäkin olosuhteissa. Myös työturvallisuus parantuu koneohjauksella varustetuilla työmailla, sillä työkoneiden lähellä työskentelevien henkilöiden, kuten konetta avustavan maarakennusmiehen ja mittajien, tarve työskennellä koneen välittömässä läheisyydessä vähenee. [4]



Kuva 3. VR Track Oy:n tekemän vertailun tulokset ratatyömaalla, jossa verrattiin koneohjauksella ja perinteisellä merkinnällä toteutettujen pintojen eroja suhteessa suunnitelmaan [8].

Koneohjauksen avulla saadaan myös parannettua rakennettujen pintojen oikeellisuutta suhteessa suunnitelmassa esitettyihin rakenteiden pintoihin. Esimerkiksi VR Track Oy:n tekemässä vertailussa (kuva 3), verrattiin perinteisellä tavalla kaivetun pohjan tarkemittausten tuloksia koneohjauksella toteutetun pinnan tarkkeiden tuloksiin. Ero on huomattava, sillä perinteisellä tavalla kaivetun pohjan tapauksessa tarkkeiden hajonta on jakautunut melko tasaisesti aina viisi senttimetriä liian syvästä kaivamisesta kaksi senttimetriä liian vähäiseen kaivamiseen. Vastaavasti koneohjauksella toteutettu pohja asettui lähes kokonaan kahdesta senttimetristä liian syvästä kaivamisesta senttimetrin liian vähään kaivamiseen. Ratatyömaaolosuhteissa koneohjauksella siis toisin sanoen kaivettiin huomattavasti vähemmän ylisyväksi kuin perinteisellä tavalla toteutetussa

tapauksessa. Kun on kyse isoista maarakennushankkeista, jo muutaman senttimetrin vähemmällä ylisyväksi kaivamisella säästetään huomattavia rahasummia, kun työmaalta poistuu turhan syväksi kaivettujen materiaalien poiskuljetusta, sekä korvaavien materiaalien hävikkiä. Samalla säästetään myös polttoainekuluissa kun kuorma-autojen, kaivinkoneiden ym. työkoneneiden ns. turha työ vähentyy. [4; 8.]

### 2.3 Tietomalli

Kuten luvussa 2.1 todettiin, on rakennustyömaiden suunnitelmat perinteisesti esitetty joko paperisten- tai digitaalisten suunnitelmakuvien avulla. Molempien huonona puolella on se, että rakennushankkeen tiedot ovat hajallaan eri piirustuksissa ja raporteissa, joita saattaa isoissa hankkeissa olla jopa satoja kappaleita. Tästä johtuen esim. jonkin erityisrakenteen suunnitelmien etsimiseen paperisten suunnitelmakuvien mapeista, tai projektin tietopankista digitaalisten suunnitelmakuvien tapauksessa, on saattanut kulua huomattavasti aikaa. Tämän johdosta 1990-luvun aikana on alettu kehittämään sellaista suunnittelumallia, jossa kaikki rakennettavan kohteen tieto olisi saatavilla yhdestä ainoasta paikasta. [9]

Kyseistä ajatusmallia on nopeuttanut 2000-luvulla Suomessa nopeasti yleistynyt koneohjauksen käyttäminen etenkin maarakennuspuolen hankkeilla. Koneohjauksen rautautumisen yhteydessä on havaittu, että perinteisellä tavalla suunniteltujen työmaiden suunnitelmien vieminen työkoneneiden ohjausjärjestelmiin ei onnistu olemassa olevista suunnitelmista suoraan, vaan toimivan koneohjausmallin tekemiseen kyseisten suunnitelmien pohjalta tarvitaan ammattitaitoa ja aikaa. Suunnitelmakuvia jalostettaessa joko mittauksen, tai esimerkiksi koneohjauksen tarpeisiin, on riskinä aina se, että tietoa jää joko käyttämättä, tai se katoaa eri jalostusvaiheiden välillä. Tämän vuoksi olisikin suotavaa, että työmaalla ei tarvitsisi luoda jokaista koneohjaus ja mittausmallia itse alusta alkaen. Koneohjausmallin laskeminen ja luominen jo kertaalleen tehtyjen suunnitelmien pohjalta voidaan katsoa olevan lisäksi turhaa päällekkäistä työtä. Miksi käyttää aikaa johonkin, joka voitaisiin hoitaa jo suunnitelmien laatimisvaiheessa siten, että valmista suunnitelmaa ei tarvitsisi editoida lainkaan, tai hyvin vähän, vietäessä sitä koneohjausjärjestelmiin. [2; 8; 9.]

Ratkaisuksi tähän ongelmaan on päätetty siirtyä käyttämään tulevaisuudessa tietomallipohjaista suunnittelua (kuva 4). Talonrakennuspuolella on tätä kyseistä toimintamallia

alettu kehittää jo 2000-luvun aikana ProIT-yhteistyöprojektilla, jonka tuloksena julkaistiin sanasto, erilaisia prosessimalleja, tuotesuunnittelun ohjemalleja sekä tiedonsiirtoon liittyviä ohjeistuksia. Tietomallipohjaisen suunnittelun tuotoksena tulleesta mallista käytetään rakennuspuolella nimikettä BIM, Building Information Model. Maanrakennuksessa tätä kyseistä toimintatapaa on päätetty muokata vastaamaan paremmin alan vaatimuksia. Tämän pohjalta on vuonna 2009 aloitettu InfraTM-hanke, joka ajaa maarakennuksen tietomallisuunnittelua visiolla Infra FinBIM. Hankkeessa on tutkittu erilaisten pilottikohteiden avulla tietomallipohjaisen rakentamisen soveltuvuutta maarakennuspuolelle. [4; 10.]



Kuva 4. Tietomalli koostuu usean eri aihealueen muodostamasta kokonaisuudesta [10].

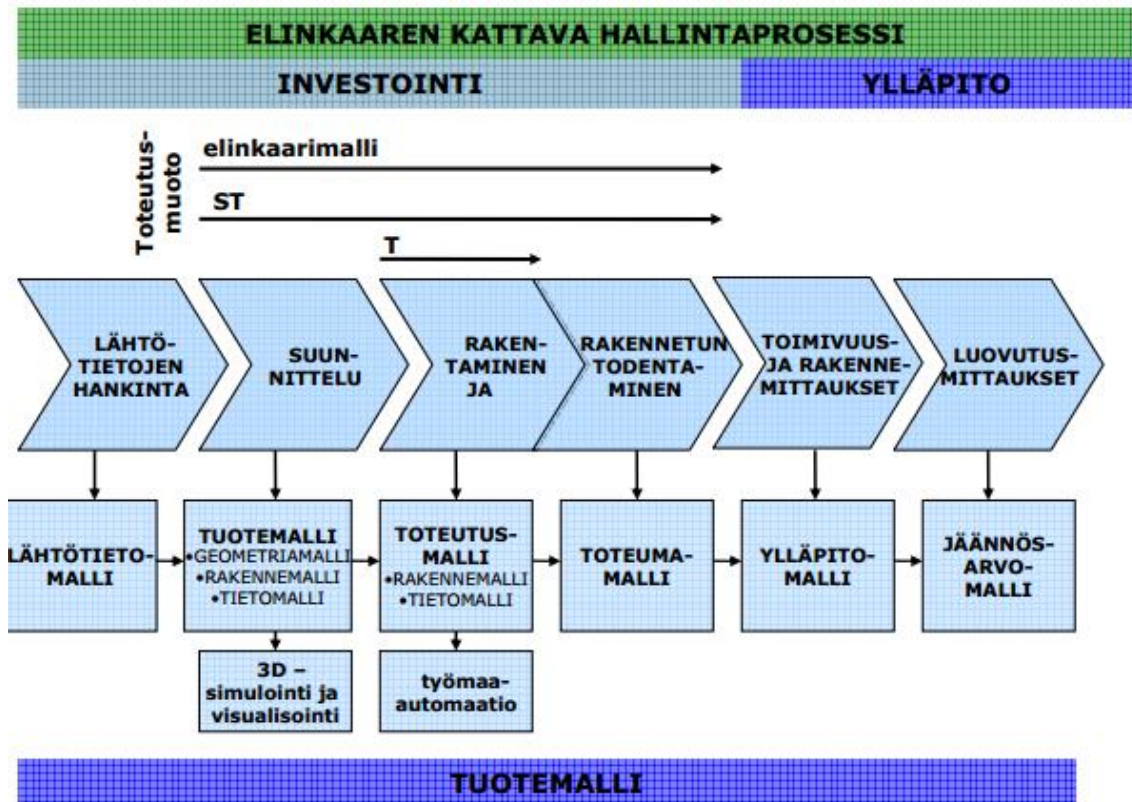
Kun puhutaan tietomallipohjaisesta suunnittelusta ja rakentamisesta, eräänä peruselementtinä on, että kukin yksittäinen tieto tallennetaan malliin vain kerran, jonka jälkeen kaikki hankkeen toimijat, aina mittaushenkilöstöstä ylläpitoon asti voivat hyödyntää tietoa omiin tarpeisiinsa. Dokumenttien tietosisältö voidaan asettaa näkyviin kunkin käyttäjän tarpeita vastaavaan muotoon. Esimerkiksi koneohjausmallia tehdessä voidaan mallista karsia pois turha tieto, jolloin jäljelle jää vain tarvittava tieto kolmiulottei-



sena tietokonemallina, josta koneohjausmallin jalostaminen loppuun käy helposti ilman turhia digitoimisia ja koordinaatistomuunnoksia. [4; 10.]

Tietomallipohjainen suunnittelu kuvaa kohdetta yksittäisen tietomallien avulla. Yksittäiset tietomallit jaetaan kuuteen eri kokonaisuuteen koko hankkeen elinkaaren aikana, jotka yhdessä täydentävät toinen toistaan muodostaen yhden jatkuvan ja eheän kokonaisuuden (kuvat 4 ja 5). Mallit koostuvat kokonaisuuksista, joissa kohdetta kuvataan kolmiulotteisesti erilaisten attribuuttien eli ominaisuustietojen avulla. Kohteen rakenneosat mallinnetaan realistisen kokoisina toisiinsa nähden, joka yhdessä kolmiulotteisen mallintamisen kanssa mahdollistaa eri rakenteiden välisten törmäyskohtien paikantamisen ja korjaamisen, kun vastaavasti ennen kyseisenkaltaiset ongelmat on todettu vasta rakentamisen yhteydessä. [2; 28.]

Hankkeen luominen lähtee käyntiin lähtötietojen hankinnalla, joista muodostetaan lähtötietomalli. Suunnittelijat pääsevät hyödyntämään saatua mallia oman tuotemallinsa rakentamisessa. Tästä johtuen onkin syytä mainita, että koko projektin onnistumisen kannalta tärkeänä kriteerinä on toimivan ja oikeellisen lähtötietomallin tuottaminen, sillä kaikki tuleva suunnittelu ja rakentaminen perustuvat kyseisessä mallissa esitettyihin lähtötietoihin. Tämän vuoksi lähtötietomallia mitattaessa tulisi pyrkiä mahdollisimman suureen mittaustarkkuuteen sekä mitata maastosta kaikki oleelliset tiedot mallia varten.



Kuva 5. Tietomallipohjaisen rakentamisen elinkaari [37].

Itse rakentaminen tapahtuu toteutusmallin avulla. Toteutusmalli on tuotemallista jatkojalostettu malli, jossa on rakentamista ajatellen poistettu turhaa tietoa käytettävyyden parantamiseksi. Toteutusmallia voidaan hyödyntää suoraan sekä mittausorganisaation että koneohjauksen yhteydessä.

Rakentamisen aikana toteutusmallin kanssa käsi kädessä kulkee myös toteumamalli, johon kerätään ominaisuustieto kaikista työmaalla toteutuneista rakenteista. Tämän tiedon avulla työn valvoja ja tilaaja voivat seurata suoraan, kuinka hyvin rakentaminen noudattaa suunnitelmissa kuvattuja tietoja sekä toleransseja, ja puuttua tarpeen vaatiessa toteutuneeseen jälkeen välittömästi.

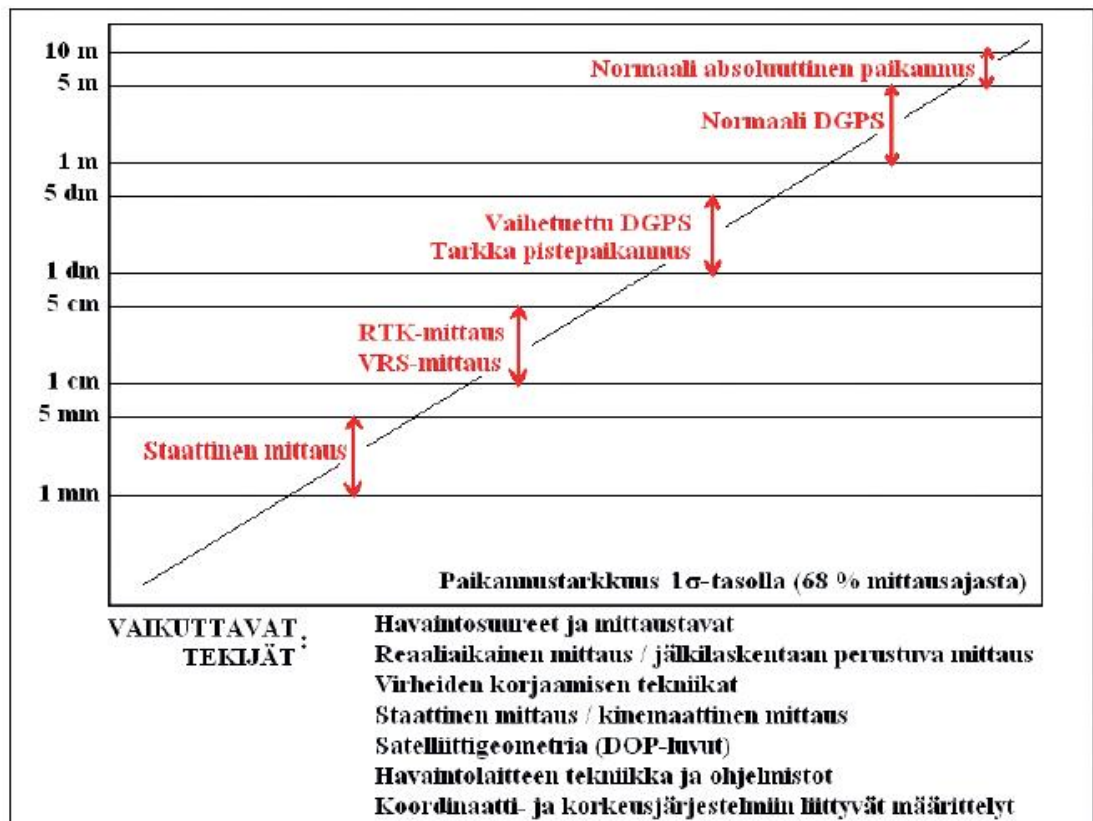
Rakennuskohteen valmistumisen jälkeen kohteen tietomalliin kerätyt tiedot ovat edelleen helposti saatavilla yhdestä paikasta. Tästä on hyötyä erityisesti silloin, kun vuosien kuluessa rakennelma alkaa lähestyä elinkaarensa päätä. Tällöin uuden rakentamisen suunnittelijat pääsevät helposti käsiksi vanhojen rakenteiden toteumatietoihin sekä kykenevät sen pohjalta suunnittelemaan uusia rakenteita tarkemmin ja joustavammin.

### 3 Satelliittipaikantaminen

Koska satelliittipohjainen paikantaminen on yleisin työkoneohjauksessa käytettävä paikannusmenetelmä, tulee tietomallikoordinaattorina toimivan henkilön ymmärtää hyvin satelliittimittauksen periaatteet ja koneohjaukseen soveltuvat menetelmät. Erilaisia satelliittipaikannusmenetelmiä löytyy lukuisia, joista tässä työssä esitellään lähinnä ne menetelmät, jotka soveltuvat käytettävyytensä ja tarkkuutensa puolesta käytettäväksi koneohjausjärjestelmien paikannuksessa joko suoraan tai välillisesti.

#### 3.1 Satelliittipaikannuksen periaate

Satelliittipaikantamisen mahdollistaa maapalloa kiertävät, muutaman metrin tarkkuudella tunnettua rataa kulkevat paikannussatelliitit. Tällä hetkellä operatiivisia satelliittipaikannusjärjestelmiä ovat yhdysvaltalainen GPS ja venäläinen Glonass, joiden lisäksi kehitteillä on eurooppalainen Galileo ja kiinalainen Compass. Satelliitit lähettävät kulkiessaan paikannussignaalia usealla eri aallonpituudella (mm. L1, L2 ja tulevaisuudessa L2C sekä L5), joihin on moduloitu tieto satelliitin numerosta, sijainnista kiertoradalla, kellonaika sekä tieto satelliitin ja järjestelmän kunnosta. Näistä signaaleista vastaanottimet selvittävät etäisyyden satelliittiin paikannusmenetelmästä riippuen joko C/A-koodihavainnon perusteella absoluuttisen satelliittipaikantamisen sovelluksissa, esimerkiksi autojen navigointijärjestelmissä, tai kantoaallon aallonpituuden avulla suhteellisen paikantamisen tapauksessa. Kun vastaanottimella on riittävä määrä satelliitteja lukittuna, saadaan niiden leikkauksien avulla määritetty vastaanottimen sijainti kuvan 6 mukaisilla tarkkuuksilla. [4; 11; 12; 13.]



Kuva 6. Satelliittipaikannusmenetelmien suhteellinen paikannustarkkuus [12, s. 315].

Vastaanottimen sijainti voidaan ratkaista menetelmästä riippuen joko jälkilaskennalla tai reaaliaikaisesti. Jälkilaskentaan perustuvalle sijainninmäärittelykselle ominaista on huomattavasti parempi sijaintitarkkuus, joka perustuu pitempiin, staattisiin havaintoai-koihin ja jälkikäteen saatavaan satelliittien tarkkaan ratageometriaan. [4; 11; 12.]

Reaaliaikaisessa paikannuksessa mittaja saa välittömästi vastaanottimelle sijaintitiedon, jonka tarkkuus riippuu käytetystä menetelmästä, ollen parhaimmillaan senttimetri- luokan tarkkuutta käytettäessä RTK-menetelmää. Vastaanottimen sijainnin laskee ha- vainnoista joko tallentimen oma tietokone tai laskentakeskus. [4; 11 ;12.]

### 3.2 Staattinen relatiivinen GNSS-mittaus

Staattinen satelliittimittaaminen on suhteellisen paikanmäärittelyn sovellus, jossa käy- tetään hyväksi pitkiä havainnointiaikoja ja koordinaattien jälkilaskentaa satelliittien tark- kujen rataparametrien avulla. Vaikka staattinen mittaaminen on satelliittipaikantamisen sovelluksena jo melko vanha, on se edelleenkin menetelmistä kaikkein tarkin. Tämän

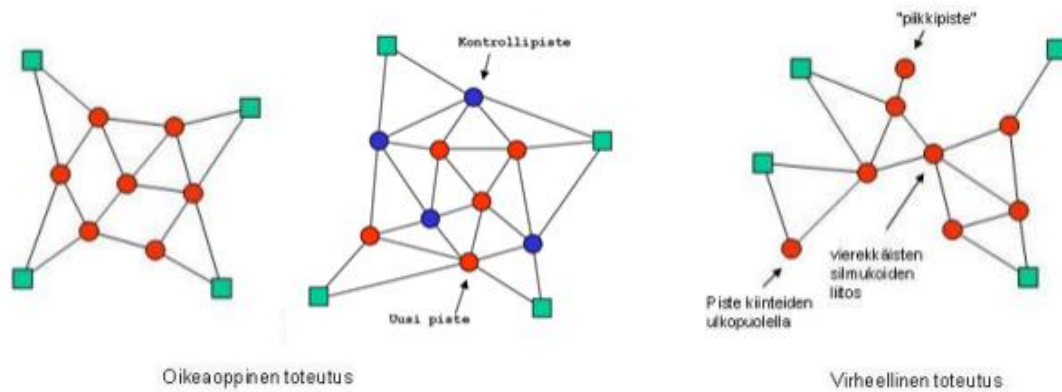
vuoksi jo JHS 184 standardi mahdollistaa sen käyttämisen jonomittaamisen ohella uusien kiintopisteiden määrittämiseen. Staattista mittaamista ei pystytä käyttämään suoraan hyväksi koneohjausjärjestelmien paikantamisessa, mutta sen avulla saadaan tarpeen vaatiessa luotua etenkin isolle, laajalle alueelle ulottuvalle työmaalle hyvä ja tarkka kiintopisteverkko, jota pystytään hyödyntämään käyttöpisteiden ja työkoneiden tukiasemien teossa. [4; 11; 12.]

Paikantamisen perusidea perustuu siihen, että mittaamiseen käytetään samanaikaisesti vähintään kahta satelliittivastaanotinta. Toinen vastaanottimista sijaitsee tunnetulla pisteellä, toisen sijaitessa uudella yhä tuntemattomalla pisteellä. Kumpikin vastaanottimista seuraa samoja satelliitteja samanaikaisesti pitkiä ajanjaksoja kerrallaan. Taulukosta 1 selviää kuhunkin JHS 184 standardin määrittelemään kiintopisteluokkaan vaaditut yhtäaikaiset havainnointiajat. Tärkeä on myös muistaa luokka-ajattelun mukainen pistehierarkia, jossa uusia pisteitä mitattaessa lähtöpisteiden tulee olla ylemmästä luokasta ja mieluiten samasta tasoituksesta, jolloin varmistetaan lähtöpisteiden hyvä yhteensopivuus. [4; 14.]

Taulukko 1. Staattisen mittausjakson pituus eri kiintopisteluokissa [14, s. 15]

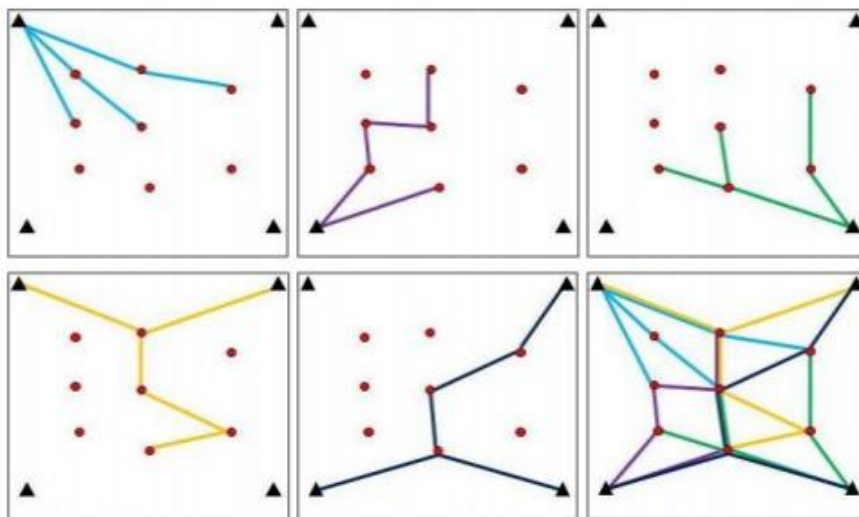
| Vektorin pituus (km) | Mittausjakson pituus (h) eri koordinaattiluokissa |    |     |     |     |     |
|----------------------|---|----|-----|-----|-----|-----|
|                      | E1  | E2 | E3  | E4  | E5  | E6  |
| 10                   | -   | 2  | 1   | 1   | 0.5 | 0.5 |
| 30                   | 8   | 6  | 2.5 | 1.5 | 0.5 | 0.5 |
| 50                   | 15  | 9  | 4.5 | 2.5 | 1   | 0.5 |
| 100                  | 19  | 13 | 8   | 5   | 3   | 2   |
| >100                 | 24  | 24 | -   | -   | -   | -   |

Vaikka staattinen relatiivinen GNSS-mittaus onnistuu teoriassa jo kahdella vastaanottimella, suoritetaan se käytännössä aina verkkomittauksena, jossa useamman tunnetun lähtöpisteen avulla selvitetään uusien mitattavien pisteiden koordinaatit. Uudet koordinaatit saadaan laskettua jälkilaskennalla, jossa uusien pisteiden koordinaatit saadaan määritettyä niiden ja tunnettujen kiintopisteiden välisten vektoreiden, sekä niiden muodostamien silmukoiden avulla. Ulommaisten lähtöpisteiden tulee sulkea uusien pisteiden verkko kokonaisuudessaan sisäänsä kuvan 7 mukaisesti. Tämän lisäksi mitattavan verkon sisäpuolella olisi hyvä sijaita ns. kontrollipisteitä, joilla pystytään seuraamaan verkon istumista jälkilaskentavaiheessa paremmin, esim. suorittamalla laskenta ensiksi käyttämällä kaikkia tunnettuja lähtöpisteitä ja vertaamalla saatuja koordinaatteja laskentaan jossa osaa kontrollipisteistä ei ole käytetty. [4; 14.]



Kuva 7. Staattisen relaatiivisen monikulmioverkon toteuttaminen [14, s. 10 ja 15].

Verkkoa mitatessa vastaanottimia ei tarvitse olla yhtä paljon kuin mitattavia pisteitä, sillä mittausta voidaan suorittaa osissa, joissa selvitetään eri pisteiden välisiä vektoreita. Verkon tulee muodostua sulkeutuvista kuvioista, silmukoista, jotka liittyvät viereiseen silmukkaan vähintään 2 pisteen tai vektorin välityksellä. Lisäksi verkossa ei saa olla piikkipisteitä (kuva 7). JHS 184-standardi määrittelee vahvasti kunkin kiintopisteluokan luokkakohtaiset raja-arvot aina lähtöpisteiden valinnasta jälkilaskennassa käytettäviin ratageometrioihin ja tarkkuuksiin (liite 1). [4; 11; 14.]



Kuva 8. Mittaussessioiden muodostama kokonaisuus käyttäessä 6 vastaanotinta [14, s. 18].

Mikäli staattinen relaatiivinen GNSS-verkko joudutaan mittaamaan eri sessioissa, on hyvä huomata, että yksittäisessä sessiossa mitattavat silmukat eivät saa olla sulkeutuvia. Mittaus on siis suunniteltava siten, että silmukoita mitattaessa eri mittaussessiot

täydentävät toisiaan siten, että jokaiselle uudelle määritettävälle pisteelle kertyy havaintoja ja tarvittava vektorien ylimääritys toteutuu (kuva 8). [4; 14.]

Havaintojen laskentaan tarvitaan oma laskentaohjelma, esimerkiksi Trimble Business Center. Laskentaohjelmalla ratkaistaan pisteiden väliset vektorit ja tasoitetaan ne verkko-tasoisuudessa virheyhtälötasoisuutena. Laskentaohjelman tulee ottaa huomioon ainakin satelliittimittausantennien sähköisen keskipisteen ja referenssipisteen välinen ero, jotta ratkaistavat koordinaatit osuvat oikeaan paikkaan. Tämän lisäksi tulee ottaa selvää laskentaohjelmakohtaiset erityisominaisuudet, esimerkiksi tuleeko antennikorkeus mitata suora- vai vinoetäisyytenä kiintopisteeltä antennille. [14]

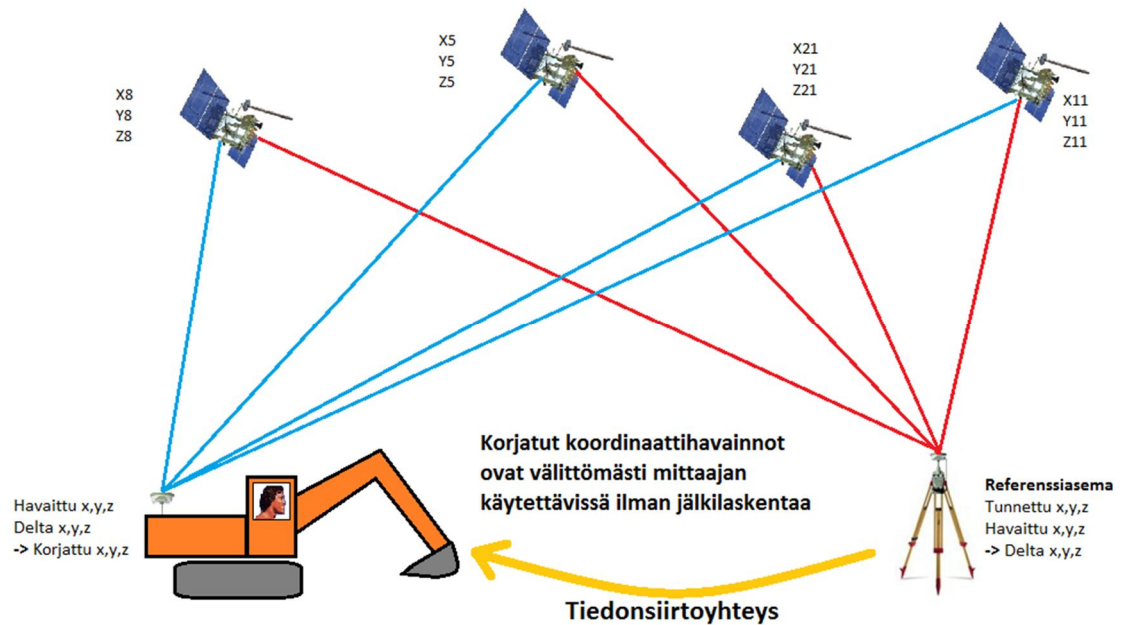
Itse laskenta tulee suorittaa neljässä osassa alla mainitussa järjestyksessä [14]:

- Lasketaan kaikki mahdolliset vektorit, mukaan lukien triviaalivektorit.
- Suoritetaan vapaa verkkotasointus, eli tasoitetaan kontrollia varten sessiokohtainen verkko minimirajoituksilla.
- Suoritetaan koko verkon tasointus minimirajoituksin. Tasointukseen otetaan mukaan kaikkien sessioiden kaikki kelvolliset vektorit kovarianssimatriiseineen.
- Suoritetaan koko verkon tasointus pitäen käytettyjä ylemmän luokan kiintopisteitä kiinteinä tai rajoitettuina.

Eri laskentaohjelmien välillä on eroavaisuuksia jotka vaikuttavat saavutettavaan laskennan tarkkuuteen. Tarkemmat ohjeet staattisen relatiivisen GNSS-mittauksen suorittamiseen ja jälkilaskentaan löytyvät esimerkiksi JHS 184-standardista sekä asiaan painutuneista insinööritöistä. [4; 14.]

### 3.3 RTK-paikannus

RTK eli reaaliaikainen kinemaattinen mittaaminen on 1990-luvun lopulla nopeasti hyvin yleiseksi muodostunut satelliittimittauksen perusmenetelmä, joka perustuu suhteelliseen paikanmääritykseen. Menetelmän etuna on se, että sillä saavutetaan välittömästi mittaajan käyttöön koordinaatit senttimetrin tarkkuudella. [11; 12.]



Kuva 9. Reaaliaikaisen kinemaattisen mittaamisen toimintaperiaate.

RTK-menetelmässä mittaamiseen tarvitaan vähintään kaksi vastaanotinta, joista toinen sijaitsee tunnetulla kiintopisteellä. Tätä tunnetulla pisteellä sijaitsevaa vastaanotinta kutsutaan referenssiasemaksi. Referenssiasemalla sijaitseva vastaanotin seuraa näkyviä satelliitteja ja vastaanottaa niiden lähettämää signaalia. Vastaanotin suodattaa signaalista pois vaihemoduloidun koodin, jonka jälkeen jäljelle jää puhdas kantoaaltoväri, josta voidaan havaita kantoaallon aallonpituus. Havaitun aallonpituuden avulla vastaanotin määrittää etäisyyden kyseiseen satelliittiin. Ilmakehästä aiheutuvaa virhettä pyritään eliminoimaan sillä, että satelliitit lähettävät signaalia vähintään kahdella eri taajuudella. Kun vastaanotin saa määritettyä etäisyyden vähintään neljään eri satelliittiin, saadaan kellovirhe poistettua, jonka jälkeen vastaanottimelle saadaan laskennassa määritettyä tarkat koordinaatit. Paikannuksen tarkkuus on muutaman prosentin luokkaa kantoaallon aallonpituudesta, joka on taajuudella  $L1 \approx 19 \text{ cm}$  ja  $L2 \approx 24 \text{ cm}$ . Tällöin lopullisessa tarkkuudessa puhutaan parhaillaan alle yhden senttimetrin tarkkuudesta tasossa, korkeuden ollessa noin viiden senttimetrin tarkkuusluokkaa. Kun näitä koordinaatteja verrataan kiintopisteen tunnettuihin koordinaatteihin, saadaan erotuksena korjausarvo. [4; 11; 12; 34.]

Havaitsemiseen käytettävä vastaanotin seuraa samoja satelliitteja kuin referenssiasema ja korjaa omia koordinaattihavaintojaan referenssiasemalta saadun korjausarvon verran jokaista seuraamaansa satelliittia kohden omalla korjausarvolla, jolloin mittauk-



sen lopullinen tarkkuus asettuu parhaimmillaan sekä taso- että korkeusvirheestä puhuttaessa n. 1–2 senttimetrin tasolle. Korjaustieto välitetään referenssiasemalta havaitsemiseen käytettävälle vastaanottimelle tapauksesta riippuen joko matkapuhelinverkon tai radiomodeemin kautta (kuva 9). Radiomodeemia käytettäessä kantama riippuu maastosta, ollen parhaillaan noin kymmenen kilometrin luokkaa tasaisilla ja alavilla mailla. Matkapuhelinverkkoa käytettäessä ei tiedonsiirron kannalta ole olemassa enimmäismatkaa, mutta mittaustavan itsensä luomien rajoitteiden vuoksi maksimaalinen toimintaetäisyys ihanneolosuhteissa on n. 20 kilometriä. Kuitenkin yleensä jo 10 kilometrin etäisyys tukiasemasta alkaa olla käytettävyyden rajamailla, kun puhutaan senttimetritarkkuuteen pääsemisestä. 10–20 kilometrin etäisyydellä tukiasemasta ionosfäärin virheet alkavat lähentelemään suuruudeltaan paikannussignaalin kantoaallon aallonpituutta, jolloin aallonpituuksien ratkaisussa ei voida enää saavuttaa riittävän luotettavaa tulosta. [4; 11; 12.]

RTK-mittaus soveltuu hyvin sellaisten työkoneiden ohjausjärjestelmän paikannukseen, joissa valmiin työn toleranssit sallivat n. 3–5 senttimetrin sijaintiepävarmuuden. Menetelmällä saadaan välittömästi tarkka korjattu paikkatieto järjestelmän käyttöön, kun toimitaan sopivan etäisyyden päässä referenssiasemalta. RTK-menetelmä onkin tänä päivänä yleisin koneohjausjärjestelmien paikannusmenetelmä joustavuutensa ansiosta. [2; 4.]

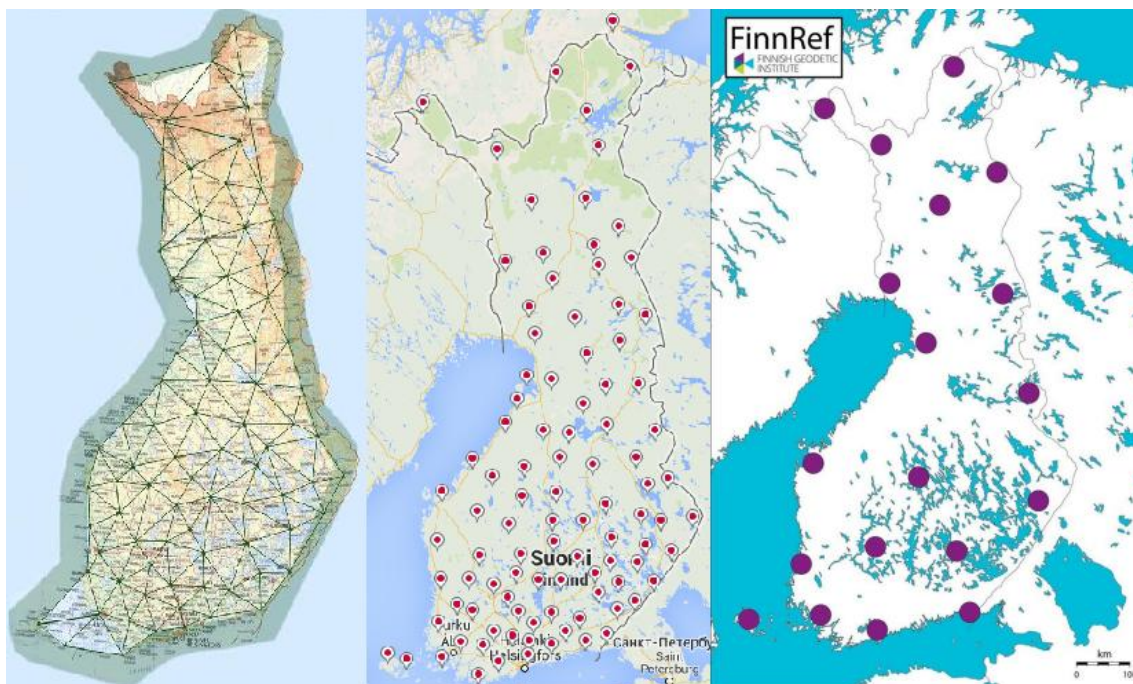
### 3.4 Verkko-RTK-mittaaminen

Kuten jo edellisessä kappaleessa todettiin, voidaan RTK-mittausta käyttää vain hyvin rajallisella alueella, mikä johtuu käytössä olevasta yhden referenssiaseman ratkaisusta. Kun käytössä olevien referenssiasemien lukumäärää lisätään, muodostuu näistä oma tukiasemaverkko. Tukiasemaverkon avulla saadaan ilmakehästä mallinnettua virhelähteet paremmin pois, jolloin on mahdollista saada luotettavampia koordinaatteja pitämällä toimintaetäisyyksillä. Useampaa tukiasemaa käytettäessä puhutaan verkko-RTK-mittauksesta. [12]

Trimblen VRS eli Virtual Reference Station-järjestelmä on yksi mahdollinen tukiasemaverkkoon perustuva ratkaisu. VRS:n toiminta perustuu kiinteisiin tukiasemiin, joilla seurataan satelliittihavaintojen pohjalta laskettujen koordinaattien eroa tunnettujen kiintopisteiden koordinaatteihin. Erotuksena saadaan korjausarvoja aivan kuten perinteisen

RTK-mittaamisen tapauksessa, mutta useampaa tukiasemaa käytettäessä ilmakehästä syntyvä virhe saadaan mallinnettua huomattavasti tarkemmin kuin yhden tukiaseman ratkaisussa. Tukiasemien korjaustieto välittyy laskentakeskukseen, joka välittää sitä kyseisellä alueella operoiville mittajille. Mitattaessa VRS-verkossa mittajan käyttämä vastaanotin lähettää ensiksi oman likimääräisen sijaintinsa laskentakeskukselle gsm-verkon välityksellä. Laskentakeskus luo mittajan läheisyyteen virtuaalisen tukiaseman, jolle laskentakeskus välittää lähimmän fyysisen tukiaseman havaintodatan. Samalla laskentakeskus määrittää ja interpoloi virtuaalitukiaseman paikassa vaikuttavat virhelähteet, jonka jälkeen laskentakeskus aloittaa RTK-korjauksen lähettämisen mittajan käyttämälle kartoitusvastaanottimelle aivan kuten korjausdata tulisi käytettäessä kiinteää tukiasemaa. [12; 13; 15.]

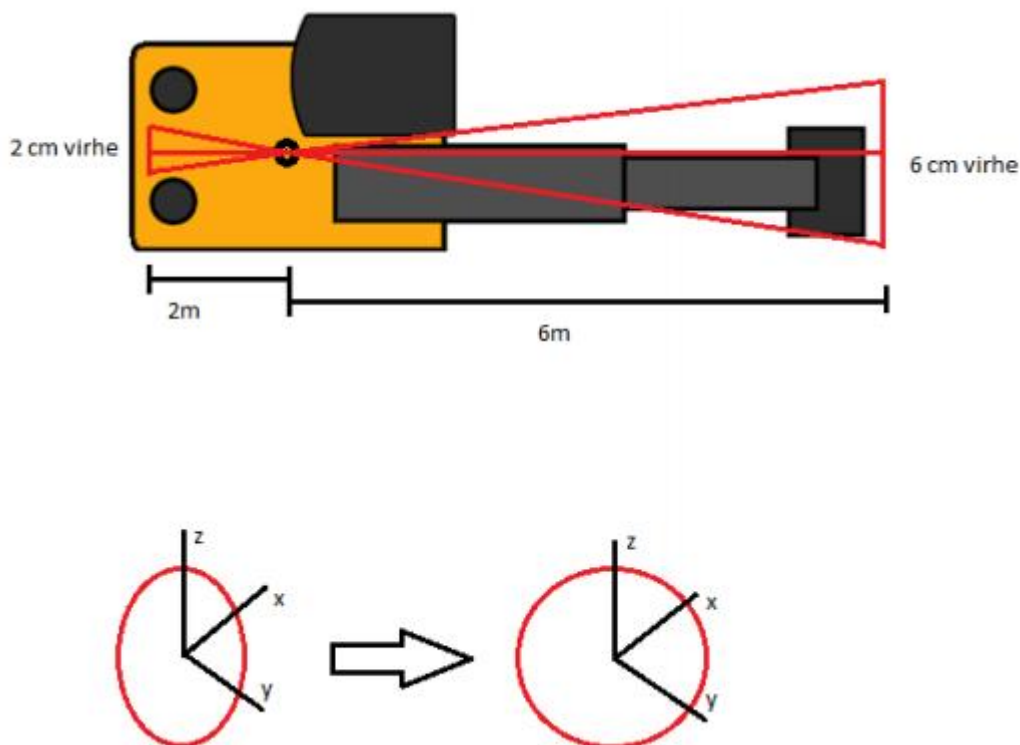
Suomessa VRS-palvelua tarjoaa Geotrim Oy, Leica Geosystems sekä Geodeettinen Laitos. Ensimmäisenä markkinoille saapunut Trimblen VRS-palvelu, nykyisin Trimnet, on edelleen käyttäjämäärältään suurin. Trimblen tukiasemaverkko koostuu yli sadasta ympäri Suomea olevasta kiinteästä referenssiasemasta (kuva 10). Leican Smartnet virtuaalitukiasemapalvelu saapui Suomen markkinoille muutama vuosi Trimblen palvelun jälkeen. Kuten VRS, myös Smartnet koostuu yli sadasta kiinteästä tukiasemasta Suomessa. Kumpikin palvelu lupaa paikannustarkkuudekseen tasossa n. 1–2 senttimetrin luokkaista tarkkuutta, korkeustarkkuuden ollessa 4–5 senttimetrin tietämillä. Etenkin perinteistä RTK-mittausta heikompi korkeustarkkuus perustuu juurikin siihen, että korjaukseen käytettävä tukiasema ei sijaitse enää työmaan välittömässä läheisyydessä, vaan jopa muutaman kymmenen kilometrin päässä. [16]



Kuva 10. Trimblen, Leican ja Geodeettisen Laitoksen tukiasemaverkot [15; 17; 38].

Geodeettisen laitoksen tukiasemapalvelu eroaa paljon edellä mainituista Trimblen ja Leican palveluista, ollen käyttäjilleen ilmainen. Tukiasemaverkko koostuu 19 kiinteästä tukiasemasta. Tukiasemien huomattavasti vähäisempi määrä tarkoittaa myös heikompa paikkannustarkkuutta, jonka tavoite on koko maassa alle 50 cm tasossa, parantuen parhaimmillaan jopa kahteen senttimetriin toimittaessa alle sadan kilometrin päässä tukiasemalta. Harvan tukiasematiheydensä vuoksi palvelu ei sovellu tehokkaasti hyödynnettäväksi maanmittauksessa tai koneohjauksessa. [17]

Virtuaalisen tukiasemaan perustuva RTK-mittauksen heikoimpana lenkinä on gsm-verkko. Mikäli gsm-verkossa ilmenee ongelmia, etenkin heikon kentän alueilla, ei tarkasta paikantamisesta tule mitään yhteyden katkeillessa. Tästä syystä kyseistä paikannuksen muotoa voidaan hyödyntää koneohjauksessa lähinnä sellaisilla alueilla, joissa esiintyy vähintäänkin hyvä 3G-verkko, jolloin paikantamisessa ei pääse syntymään verkosta aiheutuvia katkoksia.

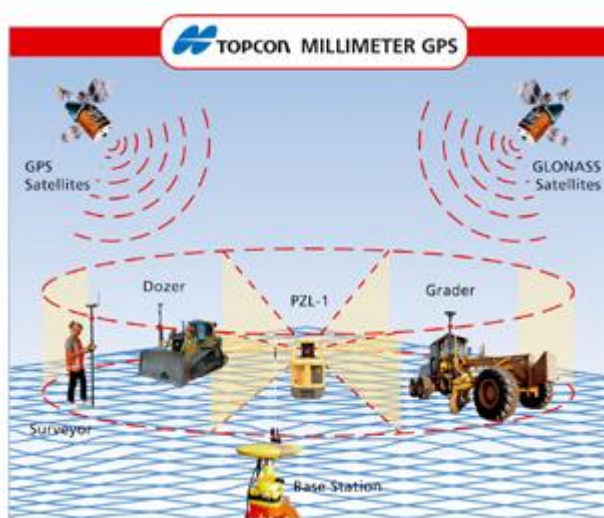


Kuva 11. Sijaintitarkkuuden huonontuminen kaivinkoneessa [6, s. 9].

Etenkin kaivinkoneen koneohjauksessa käytettävän virtuaaliseen tukiasemaan perustuvan RTK-mittaamisen paikannustarkkuuden virhekuvaaja muuttuu kananmunan muotoisesta virhe-ellipsoidista, jossa tasotarkkuus on huomattavasti parempi kuin korkeustarkkuus, pyöreäksi palloksi, jolloin tasotarkkuus heikkenee korkeustarkkuuden luokkaiseksi (kuva 11). Tasotarkkuuden heikkeneminen perustuu työkonen fyysisiin ominaisuuksiin. Paikantamiseen käytettävät satelliittivastaanottimet sijaitsevat poikkeuksetta koneen takana olevan moottoritilan päällä, josta matkaa koneen pyörimiskeskisteeseen on vain n. 2 metrin verran. Vastaavasti mallinnettavan kauhan nurkkapisteet voivat sijaita jopa useiden metrien päässä edellä mainitusta pyörimiskeskisteestä. Tällöin normaalissa paikantamisessa saavutettava 2 senttimetrin paikannusepä-tarkkuus kertaantuu suhteessa puomin pituudessa. [6]

### 3.5 Topconin MmGPS-paikannusjärjestelmä

MmGPS on Topconin koneohjaukseen kehittämä satelliittipaikantamisen erikoissovellys, jonka on tarkoitus tarjota käyttäjilleen satelliittipaikantamisen nopeus ja vaivattomuus yhdessä laserjärjestelmän tarkkuuden kanssa. Järjestelmä on tarkoitettu hyödynnettäväksi etenkin tiehöylissä ja puskukoneissa, joiden paikantamiseen perinteinen satelliittipaikannus ei yksistään riitä. [7; 18].



Kuva 12. Topconin mmGPS-järjestelmä [18].

Järjestelmä koostuu työmaalle pystytettävästä laserlaitteesta, joka muodostaa ympärilleen halkaisijaltaan 600 metriä leveän ja 10 metriä korkean työskentelyalueen (kuva 12). Kun yhdistetään kaikki neljä paketin mukana tulevaa laserlähetintä, saadaan toimivaksi työalueeksi jopa 2 400 metrin kokoinen alue. Työkoneeseen kiinnitetään PZS-MC-laservastaanotin, joka kykenee tunnistamaan samanaikaisesti neljä eri laserlähetintä (kuva 13). Vastaanotin laskee laserlähettimien lähettämän säteen avulla korkeusasemansa jopa millimetrin tarkkuudella. Tasotarkkuutensa työkoneet määrittävät GNSS-paikannusta hyväksikäyttäen. [7; 18.]



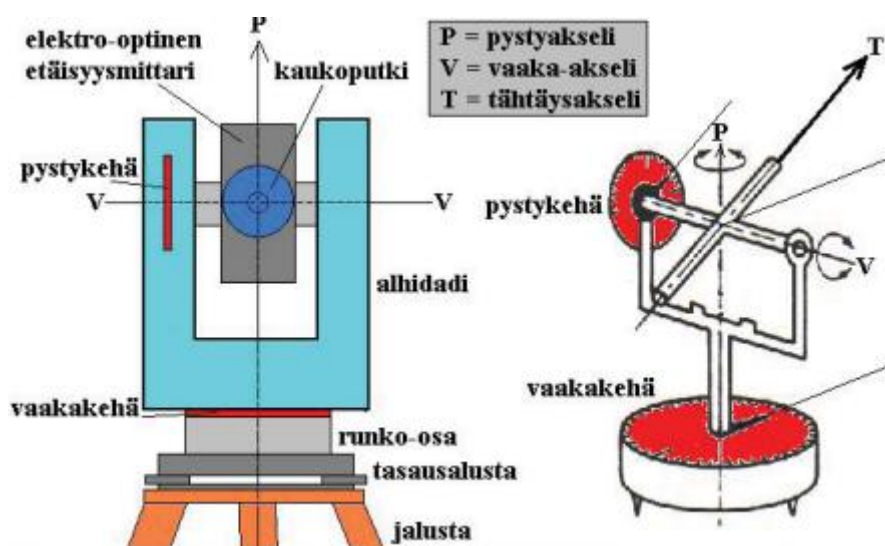
Kuva 13. PZS-MC vastaanottimet kiinnitettynä työkoneeseen [5].

Topconin mmGPS järjestelmä on varteenotettava vaihtoehto työmaille, joissa käytetään tiehöyliä ja puskukoneita, sillä se tarjoaa takymetrimittauksista huomattavasti isomman mittausalueen kerralla käytettäessä kaikkia neljää laserlähetintä. Järjestelmää koskevat samat rajoitteet kuin takymetria käytettäessä, sillä kumpuileva ja metsäinen maasto rajoittaa maksimaalista toimintaetäisyyttä. Laserlähettimien pystyttäminen on lisäksi yksinkertaisempi toimenpide kuin takymetrin, jonka johdosta pystytyksessä sattuvan virheen mahdollisuus on pienempi. On kuitenkin muistettava, että laserlähetin on säädettävä oikeaan korkeusasemaan, jotta myös sen lähettämä lasersäde välittää oikeata korkeustietoa vastaanottimille. [7; 18.]

## 4 Paikantaminen takymetrin avulla

### 4.1 Takymetrin toiminta- ja käyttöperiaate

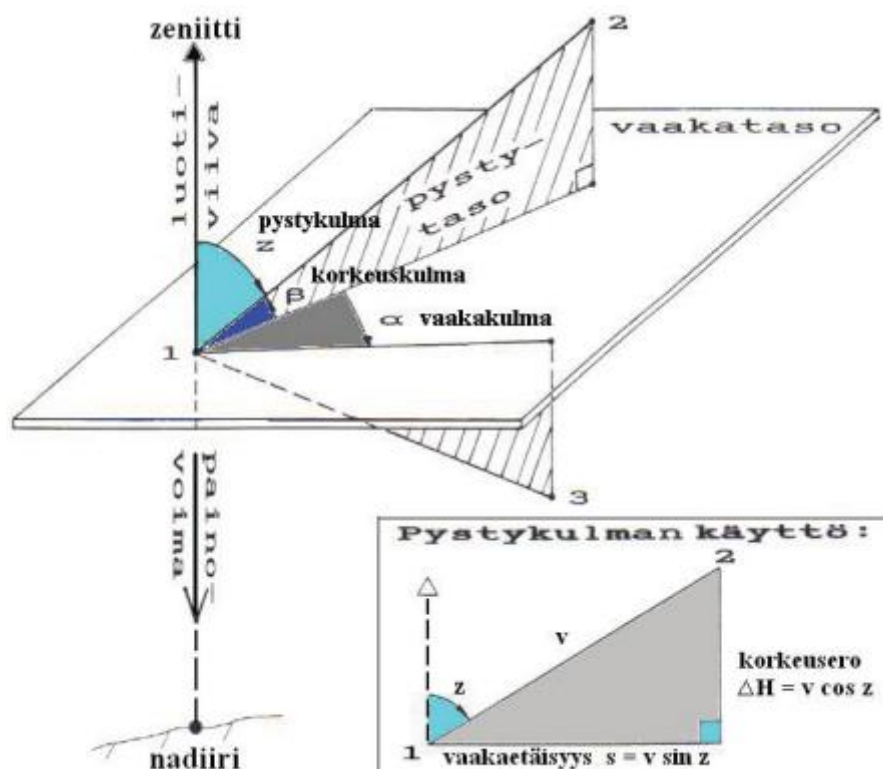
Takymetri on maanmittauksen perustyökalu, jolla mitataan polaarisesi eli säteittäisesti pisteiden sijaintia kolmiulotteisessa koordinaatistossa kojeeseen itseensä nähden. Nykyaikaiset takymetrit syntyivät, kun teodoliitteihin liitettiin elektro-optinen etäisyysmittari. Takymetrit yleistyivät käytössä nopeasti 1980-luvun aikana, kehittyen nopeasti kahden mittaushenkilön vaatimista kojeista moderneiksi robottimittauslaitteiksi, joilla jo yksi mittaaja kykenee suorittamaan itsenäisesti valtaosan rakennusmittauksista. [12]



Kuva 14. Takymetrin rakenneosat [12, s. 239.]

Takymetrillä mittaaminen perustuu trigonometriseen kolmioiden ratkaisuun, jossa kojeen sisällä sijaitsevista vaaka- ja pystykehistä selvitetään mitattavan pisteen ja kojeen väliset korkeus- ja vaakakulman, elektro-optisen etäisyysmittarin selvittäessä edellä mainittujen tekijöiden välisen vinomatkan (kuvat 14 ja 15). Takymetri kykenee laskemaan itsenäisesti edellä mainittujen tietojen avulla pisteiden sijainnit trigonometrisesti millimetritason tarkkuudella, olettaen että käytetyt lähtöpisteet mahdollistavat sijaintitarkkuudeltaan sen. [6; 12.]





Kuva 15. Trigonometrinen sijainninmäärittäminen [12, s. 59.]

Takymetrin toimintakuntoon laittaminen alkaa kojeen alustan, yleisimmin kolmijalan pystyttämällä. Paikan valinnassa tulee kiinnittää huomiota jalustan stabiiliuteen, jotta koje ei pääse käytön aikana liikkumaan ja kallistelemaan ylimääräisiä. Kojen tulisi pystyt-  
tää lisäksi paikalle, josta sille aukeaa mahdollisimman aukoton näköyhteys mitattavalle alueelle sekä näkyvyys riittävälle määrälle orientointipisteitä. Paikan tulisi olla myös suojaisa, jotta riski sille että esimerkiksi jokin työkonetta osuu ja kaataa kojeen, on mah-  
dollisimman pieni.

Takymetri kiinnitetään mittausalustaan kiertämällä kiinnitysruuvi takymetrin alapuolella olevan tasausalustan pohjaan. Tasausalustan ja kolmijalan välisten pintojen väliin ei saa jäädä ylimääräisiä epäpuhtauksia, jolloin mahdollistetaan tasausalustan tasainen kiinnittyminen. Tasausalustan säätöruuvien ja karkean optisen tasauskuplan avulla takymetri asetetaan vaakatasoon. Viimeisin tasauksen hienosäätö suoritetaan kojeen oman elektronisen tasaimen avulla.

Takymetrin orientointi eli asemointi suoritetaan tavasta riippuen joko vapaan- tai tunnetun asemapisteen metodilla. Vapaan asemapisteen tapauksessa koje asemoidaan en-



tuudestaan tuntemattoman pisteen päälle käyttämällä apuna vähintään kolmea tunnettua kiintopistettä. Teoriassa toimenpide voidaan tehdä jo kahden tunnetun pisteen avulla, mutta jotta asemointiin liittyviä virhelähteitä saadaan kontrolloitua paremmin, tulee asemoinnissa käyttää myös kolmatta tunnettua pistettä. Takymetrillä mitataan tapauksesta riippuen etäisyys- ja kulmahavainnot orientointipisteille käyttämällä joko prismatonta tai prismallista mittaustapaa. Prismaa käytettäessä tulee huolehtia, että kojeeseen on syötetty prismaa vastaavat sauvakorkeus ja prismavakio. Takymetri laskee havaintojen perusteella oman sijaintinsa XYZ-koordinaatit, minkä jälkeen itse varsinainen mittaaminen voi alkaa.

Tunnetun asemapisteen tapauksessa takymetri pystytetään fyysisesti tunnetun kiintopisteen päälle, jolloin asemoinnissa tarvitsee mitata suunta ja etäisyyshavainto teorias-  
sa yhteen muuhun tunnettuun pisteeseen. Kummassakin tapauksessa voidaan asemoinnin yhteydessä mitata havaintoja useampiinkin tunnettuihin lähtöpisteisiin, jolloin nähdään helpommin, mikäli jokin kyseisistä pisteistä on liikkunut fyysisesti, jonka jälkeen havainnot kyseiseen pisteeseen voidaan pudottaa pois laskennasta.

#### 4.2 Takymetrin käyttäminen koneohjausjärjestelmän paikannuksessa

Koneohjausjärjestelmien paikantamisessa takymetrimittamista hyödynnetään käytännössä vain korkean mittaustarkkuuden vaativien pintojen työstämisessä käytetyissä työkonereissa, kuten asfaltinlevittimissä sekä tiehöylissä. Maksimaalinen toimintaetäisyys takymetria käytettäessä tulisi olla maksimissaan noin kolmesataa metriä, koska tämän jälkeen maapallon pinnan kaareutuminen alkaa vaikuttamaan korkeushavaintojen luotettavuuteen. Lisäksi näköesteet sekä kumpuileva maasto haittaavat ja estävät mittaus-  
tavan käyttämistä. [2; 7.]

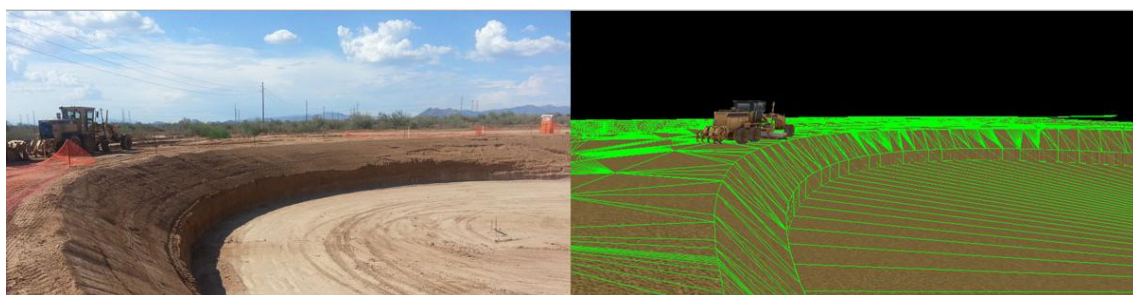
Koneohjauksessa käytettävät takymetrit ovat tehtävään erikseen suunniteltuja mittalaitteita, jotka kykenevät tavallisten robottitakymetrien tavoin lukittumaan ja seuraamaan prismaa itsenäisesti. Seurantaan käytettävä prisma sijoitetaan työkonereeseen sellaiselle paikalle, missä sille aukeaa esteetön näköyhteys jokaiseen suuntaan, jolloin mahdollistetaan paikannustiedon saaminen työkonereen kaikissa asennoissa. Prismasta tulisi sijaita samanaikaisesti myös mahdollisimman suojaisella paikalla. [7; 27.]

Töitä tehdessä takymetri lukittuu työkoneen prismaan ja mittaa tähän havaintoja noin sekunnin välein. Koneohjausjärjestelmä vastaanottaa saatua paikannustietoa reaaliaikaisesti etäyhteyden avulla ja laskee saatujen tietojen avulla prisman sijaintia kolmiulotteisessa koordinaatistossa. Kun tämän lisäksi prisman sijainti on sidottu koneen omiin dimensioihin, on järjestelmällä mahdollista yhdistää takymetrillä saadun sijaintitiedon ja inertianmittaus anturien mallintaman työkoneen puomien ja terän asentojen liikkeit, jolloin järjestelmä kykenee laskemaan terän nurkkapisteiden koordinaatit käytetyssä koordinaatistossa. [7]

## 5 Työmaalla varsinaista rakentamista edeltävät työtehtävät

### 5.1 Suunnitelma-aineiston mallintaminen koneohjausjärjestelmiin sopiviksi

Tietomallikoordinaattorina toimivan henkilön kenties yksi tärkeimmistä tehtävistä on muuttaa suunnittelijan toteuttama suunnitelma-aineisto koneohjausjärjestelmiin sopiviksi malleiksi. Ilman toimivaa ja oikeaa mallia työkohteesta ei koneohjausjärjestelmästä ole hyötyä kenellekään. Tämän vuoksi onkin tärkeää, että tietomallikoordinaattorille toimitettaisiin rakennustyömaan piirustukset hyvissä ajoin ennen varsinaisen rakentamisen aloittamista, jotta hänellä olisi riittävästi aikaa perehtyä suunnitelmiin ja rakentaa toimiva malli niiden pohjalta. [28]



Kuva 16. Koneohjausmallin perusidea [39].

Itse mallintamisprosessiin ei ole olemassa tällä hetkellä mitään yhtenäistä ohjeistusta siitä, kuinka se tulisi suorittaa ja mitkä kaikki kohteet kuuluvat sisällyttää mallinnusprosessiin. Lähimpänä koneohjausmallintamisen ohjeistusta voitaneen pitää Infra FinBIM-kokonaisuuteen kuuluvaa väylämallin toteutusmallin laatimisohjetta, joka on tarkoitettu

tuotemallien suunnittelijoiden ohjeistukseksi kyseisen hankkeen pilottiohjelmille. [27; 28.]

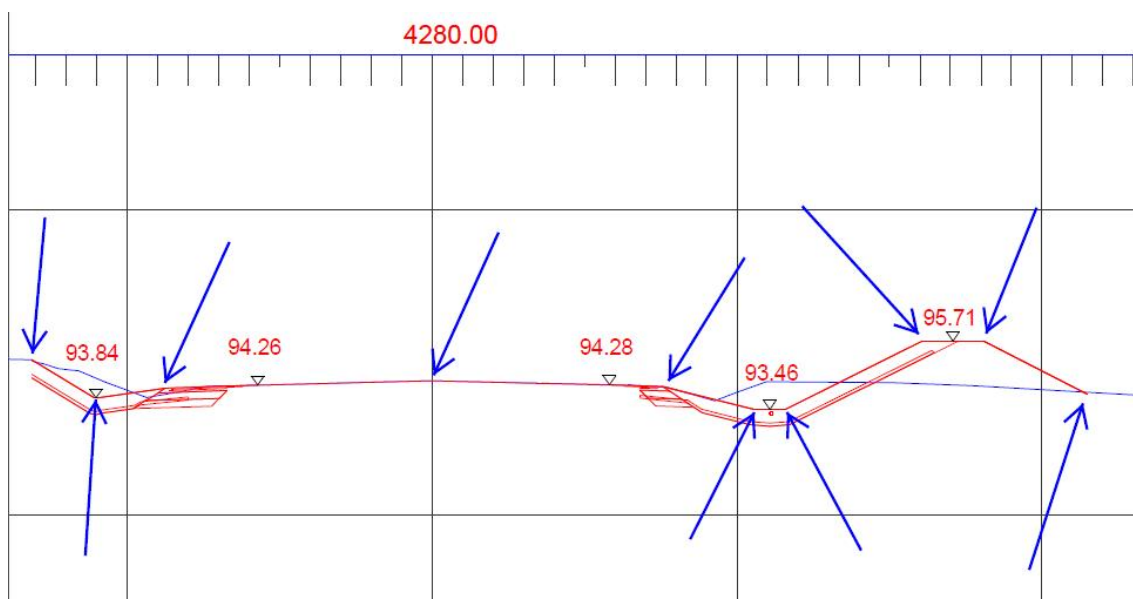
Mallinnettavia kohteita väylähankkeissa katsotaan olevan kaikki sellaiset rakennusosat, joiden toteutuksessa tullaan hyödyntämään työkonetehoa. Väylähankkeen rakenteet koostuvat pääosin seuraavista INFRA 2006 rakennusosa- ja hankenimistön mukaisista rakennusosista [19]:

- 1400 Pohjarakenteet
- 1600 Maaleikkaukset ja -kaivannot
- 1800 Penkereet, maapadot ja täytöt
- 2100 Päälysrakenteen osat
- 2400 Ratojen päälysrakenteet.

Edellä mainitun ohjeistuksen listaamien mallinnettavien kohteiden lisäksi, kun koneohjausmallia aletaan rakentaa, on hyvä tapa kysyä työn tilaajalta ja mahdollisesti myös työkonetehojen kuljettajilta, millaiset mallit he haluavat rakennettavasta kohteesta. Yleisimmin koneohjaukselle rakennettavat mallit koostuvat valmista pintaa kuvaavasta tasoitusviivamallista, tien tai kadun rakennekerroksia kuvaavista kantavan ja jakavan kerroksen sekä pohjan leikkausta kuvaavista malleista sekä jätevesi- ja hulevesiviemäriarinnin arinaa kuvaavista malleista. Tämän lisäksi koneohjausmalli voidaan luoda massavaihtovalualueista aina louhinnan alapintaa kuvaaviin malleihin, jolloin louhintamateriaalia pois kuormaava kaivinkone voi samalla tarkastella, onko suoritettu louhintaa riittävä suunnitelman tasoon nähden. Käytännössä koneohjausmalli voidaan luoda mistä tahansa rakennustyömaalla sijaitsevasta rakenteesta, jonka mallipohjaisella rakentamisella katsotaan olevan hyötyä. Rakennekerroksista ja pengerrakenteista mallinnetaan kerrosten yläpinnat, kun taas leikkaustyyppisten kerrosten ja pintojen tapauksessa mallinnettavana pintana toimii rakenteen alapinta. [19; 27; 28.]

Rakennekerrospaksuuksien muutokset tulee sisällyttää koneohjausmalleihin. Kyseinen tilanne tulee esimerkiksi vastaan moottoritiehankkeissa, joissa itse päätien rakennekerrokset ovat paksumpia kuin siihen liittyvien ramppien rakennekerrokset. Rakennekerroksien paksuudet tulee sulauttaa toisiinsa voimassa olevien ohjeiden mukaisesti. Muutos voidaan tehdä 5 metrin matkalla, mikäli ei ole mainittu toisin. Koneohjausmallin kannalta tärkeää on, että pinnoista muodostuu kauttaaltaan jatkuvia kokonaisuuksia,

joissa ei esiinny pystysuoria korkeusaseman muutoksia, sillä näitä muutoksia ei saa malleissa olla. [19; 28.]



Kuva 17. Poikkileikkaus paaluluvulla 4280, siniset nuolet kuvaavat olennaiset kohdat tsv-mallissa, joiden kohdalle taiteviivat tulee muodostaa.

Koneohjauksessa pintamallit koostuvat taiteviivoista ja niiden väliin suoritetusta kolmiinnista (kuvat 16, 20 ja 21). Mallinnettavat taiteviivat sijaitsevat sellaisilla suunnitelman kohdilla, joissa tapahtuu pinnan muodon kannalta olennaisia taitoksia, tai viiva on muulla tapaa olennainen tuotettavan mallin kannalta (kuva 17). Poikkeuksen edellä mainittuun sääntöön luo vain suunnitelman mittalinjan muuttaminen taiteviivaksi, joka toteutetaan aina, vaikka kyseinen mittalinja sijaitsisi muutoin sellaisella rakenteen kohdalla, johon ei normaalitapauksessa luotaisi taiteviivaa. [19; 29.]

Taiteviiva-aineistoa luotaessa kannattaa eri rakenteita kuvaavat taiteviivat koodata ja nimetä johdonmukaisesti. Toimenpiteellä helpotetaan huomattavasti aineiston tulkintaa, mikäli joku muu henkilö kuin itse aineiston luoja joutuu aineistoa käyttämään. Johdonmukaisesti koodatuista taiteviivoista on helppo poimia tarvittava tieto esimerkiksi tilavuuslaskentaa varten. [27]

Varsinainen pintamalli muodostuu, kun luotu taiteviiva-aineisto kolmioidaan. Kun kolmiointi suoritetaan, muodostuu kolmioverkko joka kiinnittyy taiteviivojen taitepisteiden päihin. Tavoitteena on, että muodostuva kolmioverkko olisi mahdollisimman säännönmukainen, eli kolmioiden tulisi kiinnittyä tasaisin välimatkoin samaan taiteviivaan. Ta-

voitteeseen päästään helpoiten kun taiteviivaketjujen pituussuuntaiset taitepisteet muodostetaan tasapaaluluvuille, esimerkiksi 5 tai 10 metrin välein. Kolmioverkon säännöllisyydellä pystytään helpottamaan rakennepinnan hahmottamista. Tärkeintä kuitenkin on, että kolmioverkko on jatkuva eikä se sisällä reikiä. [19; 28.]

Koska kolmioverkkomalli kuvaa kohteen mallinnettua pintaa kolmioiden avulla, ilmenee etenkin kaarteissa pykälää, jotka muodostuvat kolmioiden sivujen oikoessa kaarretta. Oikominen heikentää mallin tarkkuutta kyseisillä alueilla. Pykällys voidaan minimoida osittamalla mallin kaaret ennen kolmiointia. Toimenpiteen seurauksena kaarelle luodaan pisteitä esimerkiksi puolen metrin välein, jolloin kolmioiden sivut tarttuvat huomattavasti lähempänä toisiaan oleviin pisteisiin. Tarkemmin tämä toimenpide esitellään luvussa 5.1.1.

Koneohjausmallit eivät koostu aina pelkästään pintaa kuvaavista malleista, sillä eri laitevalmistajien ohjausjärjestelmät pystyvät mallintamaan myös pelkästään viiva- ja pistemäisiä kohteita. Tämä mahdollistaa esimerkiksi maa- ja ilmakaapeleiden mallintamisen suoraan koneohjausmalliin, jolloin malli varoittaa koneen kuljettajaa lähestyvistä alituksista ja ilmajohdoista, jolloin riski sähkö- tai maalämpölinjojen katkaisemiseen vähenee huomattavasti. Viivamaisia objekteja voidaan hyödyntää myös vesihuollon tapauksessa. Kaivojen väleillä olevat putkilinjat muutetaan taiteviivoiksi, joiden päälle annetaan vesijuoksujen korkeudet. Koneen kuljettaja kykenee valitsemaan mallista merkittävän viivan, jolloin kaivovälin kaivaminen onnistuu periaatteessa ilman arinan omaa mallia.

Pistemäisten kohteiden merkitseminen on hyödyllinen sovellus vaikkapa paalulaatan porapaalujen asentamiseen. Tällöin esim. Topconin ohjausjärjestelmällä varustettu kaivinkone kykenee sijoittamaan porapaalun muutaman senttimetrin tarkkuudella oikealle paikalleen ilman mittaushenkilöstön tekemää merkintää. Koneohjatulla työkoneella voidaan suorittaa myös tarkempien toleranssien pistemäisiä objekteja, jos työkoneen tarkkuus todetaan työsuoritteeseen riittäväksi. Tarkemmin tästä kerotaan luvussa 7. [4; 30.]

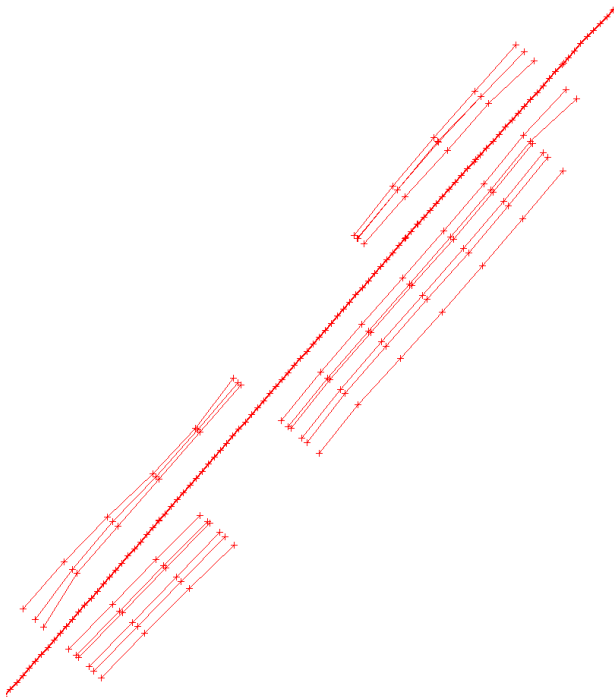
Koneohjausjärjestelmään pystytään lisäksi viemään taustakarttamaista aineistoa. Tietomallikoordinaattori puhdistaa autocad tiedostosta kaiken ns. ylimääräisen turhan tie-

don pois, jonka jälkeen jäljelle jäänyt tuotos voidaan viedä koneohjausjärjestelmään taustakartaksi, joka havainnollistaa koneen kuljettajalle työmaan piirteitä joissakin tapauksissa itse mallia paremmin.

Valmis malli voidaan ladata internettiin, josta se voidaan poimia helposti työkoneen käyttöön. Vaihtoehtoisesti luotu malli voidaan siirtää työkoneen ohjausjärjestelmän käyttöön tavallisen muistitikun välityksellä. Vastaavasti koneen tekemät toteumamittaukset voidaan poimia joko suoraan internetin välityksellä tai fyysisesti paikalla suoraan muistitikulle. [3; 6; 27.]

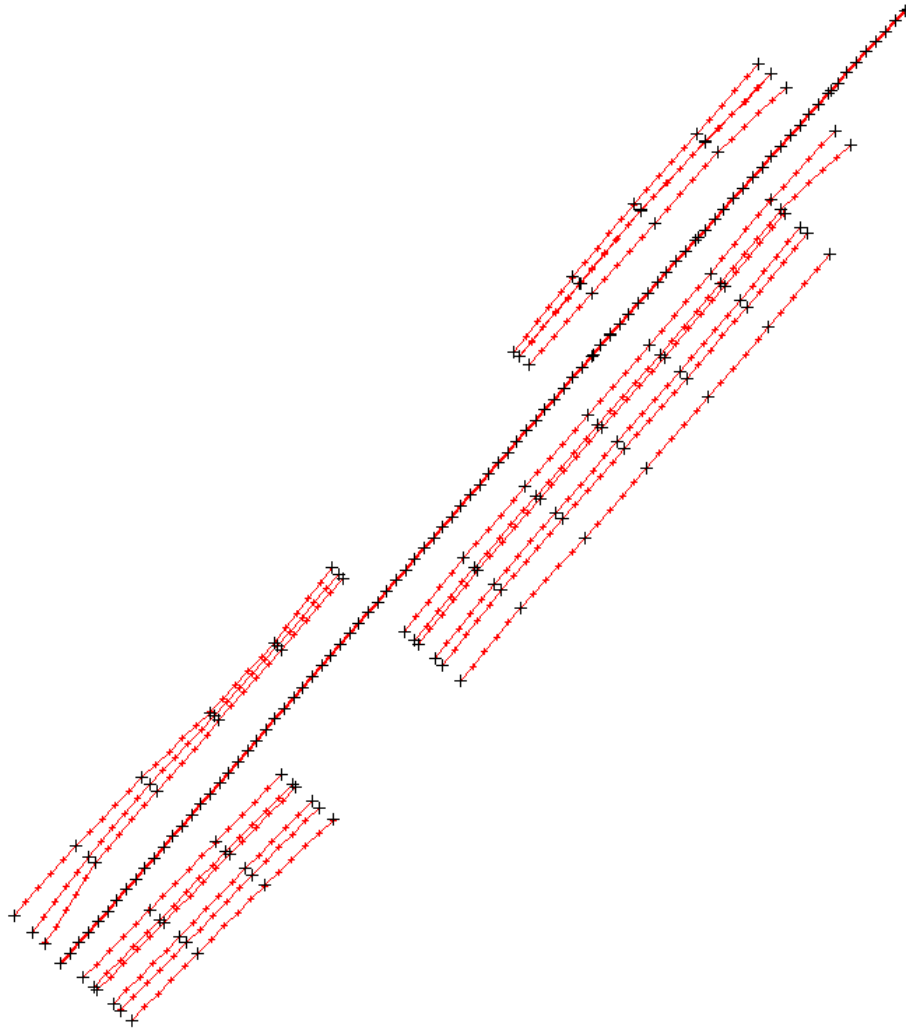
#### 5.1.1 Esimerkki pintamallin luomisesta paperisuunnitelmien pohjalta

Työmaakohtainen lähtötietoaineistojen laatu vaihtelee suuresti, riippuen eri suunnittelijoista ja siitä, mitä työn tilaaja on valmis maksamaan itse suunnittelusta. Joillekin työmailla tulee jo tällä hetkellä käytännössä kolmiointia myöten valmiita pintoja, jotka tarvitaan vain tarpeen vaatiessa muuttaa työmaalla olevien koneohjauskoneiden tukemaan formaattiin, tai viedä työmaan projektitiedostoon. Heikoimmillaan työmaalle toimitetaan kuitenkin vain esim. tien keskilinjän geometria ja pdf-poikkileikkaukset, jonka pohjalta operaattori joutuu suorittamaan mallin taiteviivojen rakentamisen pahimmillaan piste pisteeltä laskien. [6; 27; 29.]



Kuva 18. Lohjalla sijaitsevan valtatie 25:n pohjavedensuojauksen työmaan pohjoispäästä poikkileikkausten pohjalta rakennetut taiteviivat.

Mikäli koneohjausmalli joudutaan rakentamaan alusta alkaen itse, tulee ensimmäisenä tehtävänä selvittää poikkileikkauksista ne kohdat, joissa mallinnettavassa pinnassa esiintyy sellaisia muutoksia, jotka ovat oleellisia rakennettavan mallin oikeellisuutta ajatellen (kuva 17). Tämän jälkeen poikkileikkauksista selvitetään kyseisten kohtien b-mitat, eli vaakaetäisyydet suhteessa tien mittalinjaan, jota kuvaa yleisimmin tien keskilinjan vaaka- ja pystygeometriaa. Oleelliset mallin piirteet tulee selvittää paalulukukohdaisesti poikkileikkauksista, jotka ovat suunnitelmissa luotu yleisimmin 20 metrin välein toisistaan. Kun paalulukukohtaiset mitat on saatu selville, voidaan niiden perusteella laskea esim. 3D-Win-sovelluksen linjalaskentaa hyväksi käyttäen mallin pisteet, jotka tämän jälkeen yhdistetään jatkuvilla viivoilla (kuva 18).



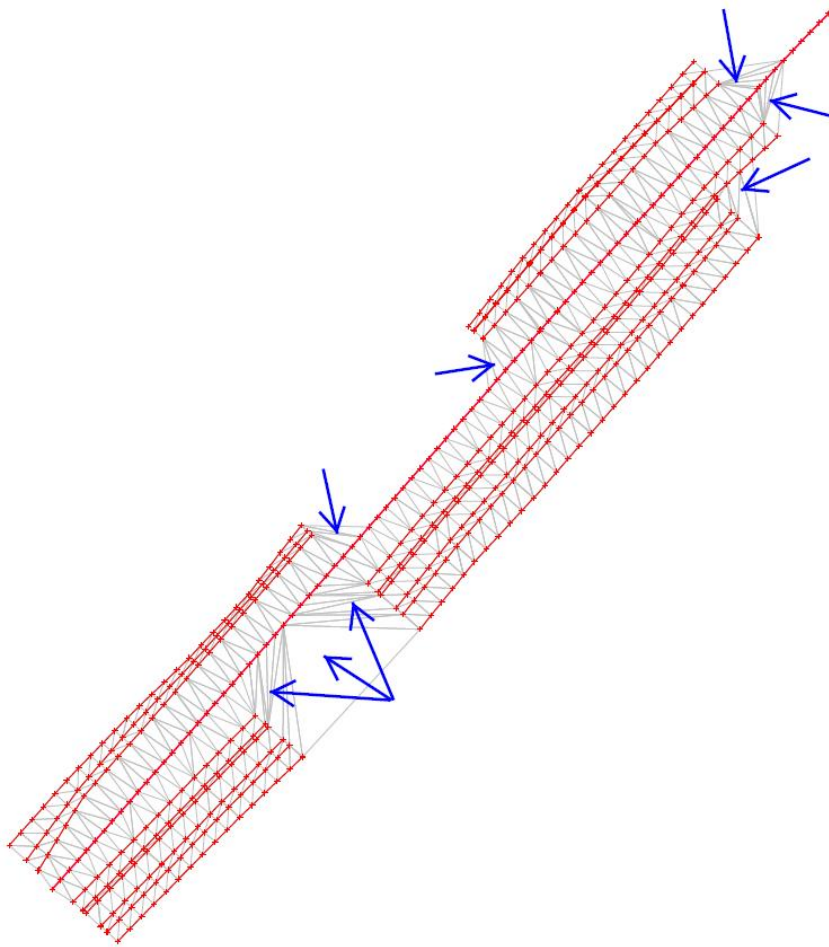
Kuva 19. Taiteviivat ja kaaret ositetaan ennen kolmiointia, jotta luotavasta mallista saadaan tarkempi.

Ennen varsinaisen kolmioinnin suorittamista on hyvä tarkastaa taiteviiva ja pisteaineisto, sekä korjata sitä, mikäli siinä esiintyy toisiaan leikkaavia tai päällekkäisiä taiteviivoja. Tämä toimenpide on erityisen tärkeä, sillä koneohjausjärjestelmät eivät kykene tunnistamaan pintoja oikein, mikäli mallissa esiintyy yksi tai useampi päällekkäinen kolmioverkko. Tämä ongelma esiintyy erityisesti silloin, jos esimerkiksi tietyömaalla on toisiinsa ylittäviä tai alittavia tielinjauksia. Ongelma saadaan ratkaistuksi helpoiten tekemällä risteävistä osuuksista omat erilliset mallinsa, joista koneen kuljettaja valitsee oikean sen mukaan kumpaa rakennetta hän työstää. [28]

Kun taiteviivat on saatu muodostettua halutulle alueelle, on seuraavana toimenpiteenä vuorossa mallin kolmiointi, jossa taiteviivojen taitepisteiden ja päiden väliin muodoste-

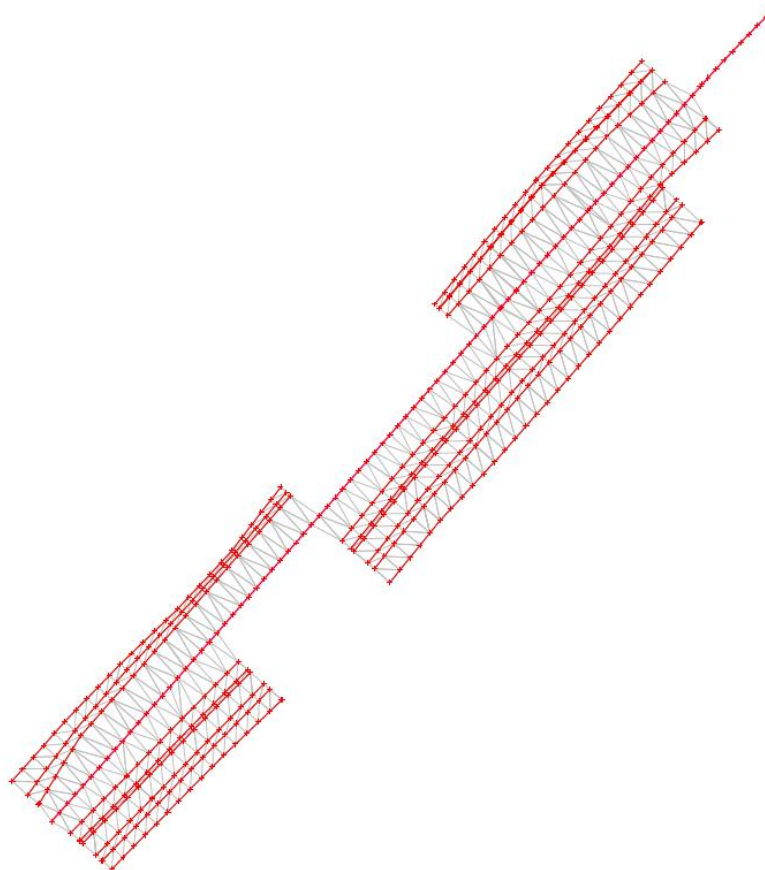


taan kolmioverkko. Tässä vaiheessa onkin hyvä huomata, että 20 metrin välein poikki-leikkauksista lasketuissa taiteviivoissa ovat taitepisteetkin 20 metrin välein toisistaan. Toisin sanottuna, mikäli kolmiointi tehtäisiin suoraan tällaiseen aineistoon, muodostuvista kolmioista tulisi hyvin suuria ja joitakin oleellisia kohtia etenkin alueiden reunoilla ja kaarissa jäisi kokonaan muodostuvan mallin ulkopuolelle. Tämän vuoksi kolmioitavat taiteviivat ja kaaret on hyvä osittaa ennen varsinaista kolmiointia (kuva 19). Se, minkä mittaisiin osiin taiteviivat ja kaaret tulee osittaa, riippuu täysin itse kohteesta ja tapauksesta. Nyrkkisääntönä voidaan kuitenkin pitää sitä, että kun kolmioinnissa muodostuu mahdollisimman tasakokoisia kolmioita, eikä kaareutuivissa osissa tapahdu merkittävää oikomista, on osituksen pituus hyvä.



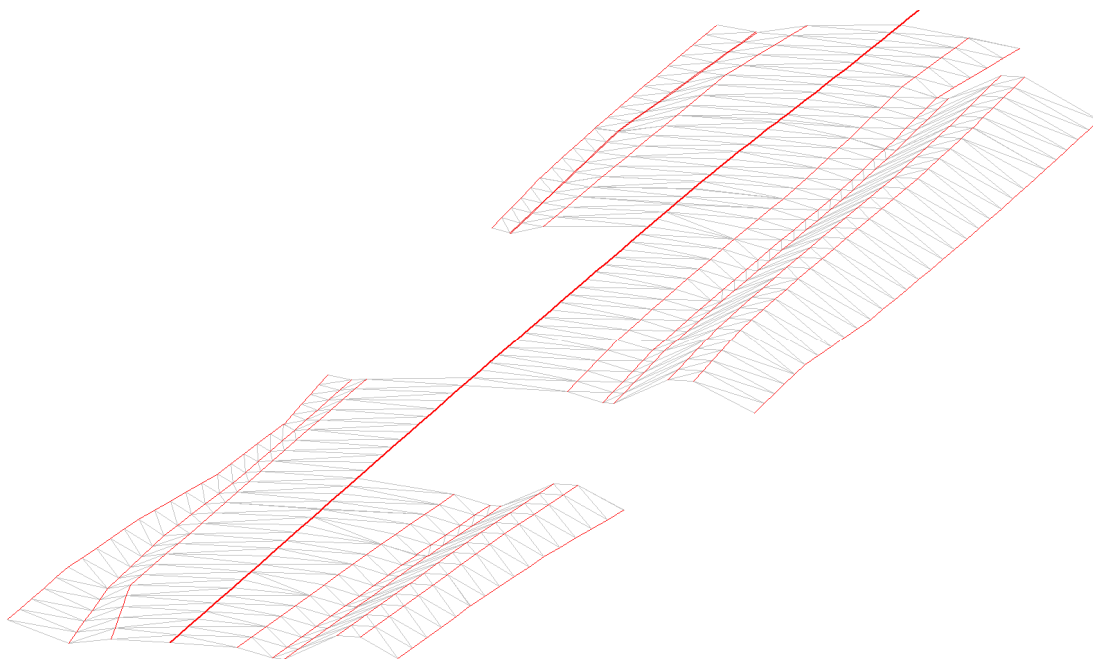
Kuva 20. Ositetuille taiteviivoille suoritettu kolmiointi. Siniset nuolet osoittavat kolmioverkossa sellaiset kohdat, joissa kolmiointi on tapahtunut suunnitelman ulkopuolisille alueille.

Itse kolmiointi on automaattinen toimenpide, jossa käyttäjä voi antaa rajaehdoja kolmiointin suorittamiselle, kuten kolmion maksimi sivun pituuden ja pienimmän mahdollisen kulman, jonka perusteella kolmio voi muodostua. 3D-Win-ohjelmistolla suoritettu kolmiointi muodostuu omalle mm-formaattiselle elementilleen, jonka editointi on helppoa. Mikäli suunnitelmassa esiintyy lähellä  $90^\circ$  asteen kulmaa olevia kohtia, joissa suunnitelma loppuu, voi kyseiselle alueelle syntyä kolmiointin yhteydessä kolmioita, jotka muodostavat mallin ns. suunnitelman ulkopuoliselle alueelle (kuva 20). Sama ongelma esiintyy myös kaareutuvien taiteviivojen sisäkaaren puoleiselle sivulla. Ongelman syy on kolmiointin yhteydessä määritettävä maksimi sivun pituus. Mikäli ohjelma havaitsee mitä tahansa pisteitä annettujen parametrien sallimissa puitteissa, muodostaa se näiden väliin kolmion. Ylimääräiset, halutun mallin ulkopuoliset kolmiot voidaan piilottaa ja poistaa valmiista mallista 3D-Winin *piilota kolmio* työkalun avulla, jolloin lopullisessa mallissa ei niitä kolmioita enää esiinny (kuva 21).



Kuva 21. Valmis malli kohteesta, joka tarvitsee vielä kirjoittaa koneohjausjärjestelmän tuke-  
maan formaattiin.

Kun kolmioverkosta on korjattu pois ylimääräiset kolmiot, on se valmis 3D-pintamalli, joka voidaan kirjoittaa ohjelmasta käytettävää koneohjausjärjestelmää tukevalla formaatilla. Lopputulosta voidaan tarkastella 3D-näkymällä (kuva 22), jolloin voidaan silmäääräisesti varmistua, että kohteen suuret linjat muodostavat oikeanlaisia pinnanmuotoja.



Kuva 22. 3D näkymä tuotetusta mallista.

Valmis malli muutetaan laitevalmistajakohtaisesti oikeaan formaattiin laitevalmistajien omilla ohjelmistoilla. Ennen kuin valmis malli viedään koneeseen, on malli hyvä tarkistaa ja sen toiminta testata tietokoneella toimivalla simulaattoriohjelmalla. Simulaattoriohjelman avulla mallin luoja pääsee tutkimaan mallia ja sen toimimista samasta näkymästä kuin itse työkoneen kuljettaja työtä tehdessään.

### 5.1.2 Eri laitevalmistajien formaateista

Eri koneohjausjärjestelmien valmistajien ohjausjärjestelmät tukevat erilaisia formaatteja, eikä esimerkiksi 3D-Winistä löydy oikeata formaattia jokaiselle koneohjausjärjestelmälle. Tämän vuoksi esim. juuri 3D-Winillä tuotetut mallit, viiva- sekä pistetiedostot joudutaan avaamaan laitevalmistajan omalla ohjelmistolla, jotta työt saadaan kirjoitettua oikealla formaatilla. Kun aineisto muutetaan laitevalmistajan formaattiin, tapahtuu samalla myös aineiston optimointi juuri kyseiselle koneohjausjärjestelmälle, jolloin jär-

jestelmän tietokoneen resurssit tulevat parhaalla mahdollisella tavalla hyödynnettäviksi. [28; 34.]

Topconin koneohjausjärjestelmät vaativat Topconin 3D-Officeella tehdyn projektin, jonka tiedostopääte on .tp3. 3D-Officeen pystytään lukemaan sisään pintatiedostoja dxf-, dwg- sekä xml-formaateissa. Pistetiedostot 3D-Office lukee sisään dwg- ja gt-formaateissa. Linjatiedostot voidaan lukea sisään xml-formaatissa. Edellä mainittujen lisäksi 3D-Office lukee tietysti sisään myös kaikkia Topconin omia mittauseroformaateja. Topconin projektitiedoston etuna verrattuna esim. Trimblen vastaavaan järjestelmään on se, että yhteen tiedostoon saadaan sisällytettyä koko työmaan mallit. [27]

Scanlaserin uusimmat koneohjausjärjestelmät pystyvät lukemaan tiedostokansioon suoraan vietyjä dxf-, xml-, trm-formaateja. Pistemäisiä objekteja Scanlaserin järjestelmät tunnistavat geo-formaatissa. Linjamaisia tiedostoja järjestelmä tunnistaa lin-, xml- ja vgp-formaateissa. Novatronin järjestelmät noudattavat pitkälti samoja formaatteja kuin Scanlaserin järjestelmät, erotuksena pisteiden lukeminen sisään gt-formaatissa ja linjat lin-formaatissa. [27]

Trimblen koneohjausjärjestelmät noudattavat pitkälle samaa periaatetta kuin Topconin järjestelmät, ollen samalla kuitenkin paljon monimutkaisempi. Koneeseen vietävät projektitiedostot tehdään joko Trimblen Business Centerillä tai Site Vision Officeella. Projektitiedostoon on luettava aina mukaan oikea koordinaatistomuunnostiedosto ja usein tätä ei voida luoda pelkästään itse ohjelmalla, vaan työmaalla on fyysisesti suoritettava Trimblen satelliittipaikantimella mittauksia paikallista muunnosta varten. Tarkemmin paikallisen muunnoksen tekemisestä on työn seuraavassa luvussa. Trimblen koneohjausjärjestelmiin vietävästä projektitiedostosta on lisäksi koordinaatistosta riippuen poistettava itä-koordinaatin edestä kaistatunnus. Lopullinen tiedosto koostuu kahdesta tai kolmesta tiedostosta riippuen onko niissä mukana linjoja. Lisäksi Trimblen yhteen projektikansioon voi luoda vain yhden mallin kerrallaan, mikä tekee mallien teosta erittäin työlästä, mikäli työmaalla on paljon eri mallinnettavia kohteita joita ei voida sisällyttää samaan malliin. Koneeseen vietävät mallit ovat svd-formaatissa, muunnostiedosto cfg-formaatissa ja linjat svl-formaatissa. [27]

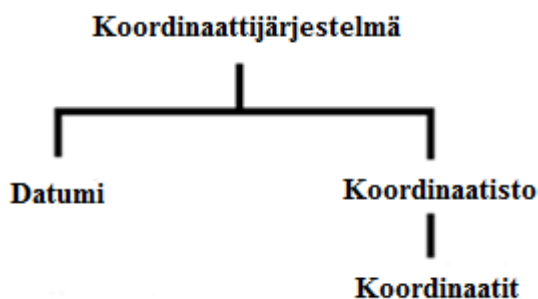
Yllä mainitut formaatit ja niiden käyttäminen eri laitevalmistajien järjestelmissä perustuvat kirjoitushetken tietoihin. Se mitä formaattia kunkin laitevalmistajan järjestelmä tukee

ja käyttää ei kerro mitään laitteen hyvytydestä tai huonoudesta, vaan kunkin laitevalmistajan järjestelmä on optimoitu toimimaan parhaiten kyseisillä formaateilla.

## 5.2 Koordinaatistot ja muunnokset

### 5.2.1 Koordinaattijärjestelmät

Koordinaattijärjestelmä on teoreettinen geodesian määritelmä, jonka avulla pisteen sijainti kyetään määrittämään yksiselitteisesti maapallon pinnalla. Koordinaattijärjestelmän määrittämiseen tarvitaan koordinaatisto sekä datumi. [11]



Kuva 23. Koordinaattijärjestelmän muodostuminen.

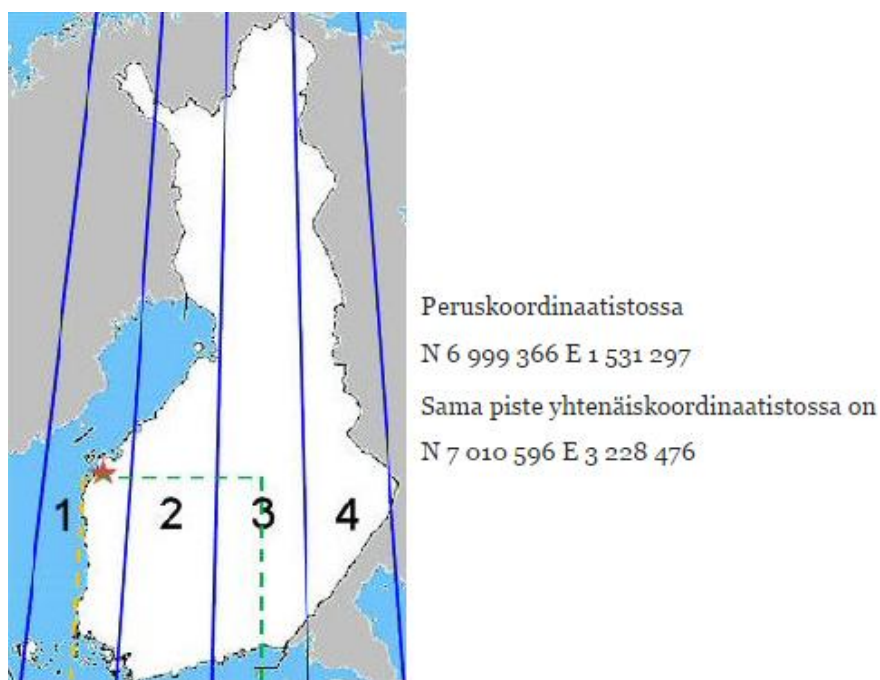
Datumi on matemaattisten suureiden joukko, joka tarvitaan maan pintaan kiinnitetyn koordinaatiston lähtöarvojen realisoimiseen. Kyseisiä lähtöarvoja ovat mm. lähtöpisteen geodeettiset koordinaatit ja luotiviivanpoikkeaman komponentit sekä geoidin korkeus lähtöpisteessä. Koordinaatisto puolestaan on koordinaattijärjestelmän maastoon tehty realisaatio, jossa tunnetuille kiintopisteille on mitattu ja laskettu koordinaatit mahdollisimman tarkoin kyseisessä koordinaattijärjestelmässä. [11]

Kohteen mallinnuksen yhteydessä on tärkeä selvittää, missä koordinaatistossa ja korkeusjärjestelmässä suunnitelmat, ja siten myös rakennettu koneohjausmalli, on toteutettu. Tämä on tärkeää, koska koneohjausjärjestelmään viennin jälkeen tulee varmistua siitä, että myös kyseisen koneohjausjärjestelmän lopulliseen paikantamiseen käytetään samaa koordinaattijärjestelmää ja korkeusmallia, jotta varsinaisen suunnitelman ja koneohjausmallin yhteensopivuus saadaan varmistettua. Koordinaattijärjestelmien väliset eroavaisuudet saattavat vaihdella sadoista kilometreistä vain metreihin. Suuret eroavaisuudet koordinaattijärjestelmien välillä voidaan tunnistaa jo sillä, että suunnitelma ei

piirry koneohjausjärjestelmän näytölle johtuen rajallisesta piirtoalueesta. Metrien suurien virheiden tunnistaminen voi olla puolestaan hyvinkin hankalaa havaita pelkästään silmämääräisesti toteamalla, jonka vuoksi järjestelmän tarkkuuden tarkistaminen työmaan koordinaatistossa ja korkeusjärjestelmässä onkin hyvä tarkistaa takymetrillä mittaamalla. [2; 4; 20.]

Eri koordinaatti- ja korkeusjärjestelmien väliset eroavaisuudet on hyvä tunnistaa, sillä jo pelkästään Suomessa on tällä hetkellä vielä yleisesti käytössä useita eri koordinaattijärjestelmiä, kuten vanha valtion järjestelmä VVJ, kartastokoordinaattijärjestelmä KKJ sekä yhteiseurooppalaisen koordinaattijärjestelmän suomalainen realisaatio EUREF-FIN. Edellä mainituista VVJ ja KKJ eivät ole enää virallisesti käytettäviä koordinaatistojia, joten tulevaisuudessa uudet suunnitelmat tulevat olemaan sidottuina EUREF-FIN-koordinaatistoon. Tällä hetkellä työmailla esiintyy vielä kuitenkin runsaasti eri suunnitelmia, joiden koordinaatistona on käytetty vanhoja koordinaatistoja. [21]

Edellä mainituista esimerkiksi KKJ koostuu kuudesta eri projektiokaistasta, joista jokainen muodostaa oman tasokoordinaatistonsa, niin sanotun KKJ:n peruskoordinaatiston. Lisäksi joissain yhteyksissä KKJ:n kaistaa numero 3 käytetään koko Suomen levyisenä, jolloin tätä yhden kaistan muodostamaa koordinaatistoa kutsutaan yhtenäiskoordinaatistoksi. Fyysisesti samassa paikassa sijaitsevan kiintopisteen tasokoordinaatit eroavat KKJ:n peruskoordinaatiston ja yhtenäiskoordinaatiston välillä, johtuen koordinaatiston projisoinnista suorakulmaisesti käytettävän kaistan keskimeridiaanille (kuva 24). [21]



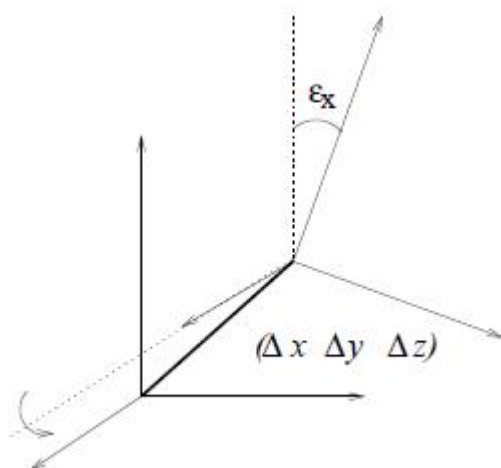
Kuva 24. KKJ:n kaistat sekä saman fyysisen pisteen eroavaisuus perus- ja yhtenäiskoordinaatiston välillä. [21]

KKJ:n ja EUREF-FIN-koordinaatistojen mukaisissa kaistoissa toimittaessa kaistannumero esitetään itä-koordinaatin edessä. Joissakin tapauksissa suunnitelmissa, tai kaupunkien omissa kiintopistejärjestelmissä, itä-koordinaatin etupuolelta saatetaan jättää pois kyseinen kaistanumerointi. Mikäli kaistanumeroa ei lisätä itä-koordinaatin eteen ennen koneohjausjärjestelmään vientiä, ei paikannus tapahdu oikein koordinaattikirjastosta valitulla koordinaatistolla pois lukien Trimblen koneohjausjärjestelmät, joissa kaistanumerointi tulee poistaa. [2;27]

Koneohjausjärjestelmien GNSS-paikannus perustuu puolestaan mittaamiseen WGS84-järjestelmässä. WGS84 on tyypiltään geosentrinen koordinaatisto, jossa origo asettuu maapallon keskipisteeseen. Järjestelmän koordinaatit voidaan muuttaa maantieteelliseksi koordinaateiksi sekä ellipsoidikorkeudeksi, mikäli kyseisen ellipsoidin määritelmä tunnetaan. Maantieteelliset koordinaatit voidaan muuttaa kartastokoordinaatteihin, jollaisia mm. VVJ, KKJ, ja EUREF-FIN-järjestelmien koordinaatistot ovat. [2]

Koneohjausjärjestelmällä töitä tekevän työkonen satelliittipaikantimien paikantaminen tapahtuu siis geosentrisessä WGS84-koordinaattijärjestelmässä, minkä jälkeen ohjausjärjestelmän tietokone muuttaa saadut havainnot siihen kartastokoordinaattijärjestelmään, joka on sen asetuksissa kullekin projektille määritetty. Mikäli koneohjausjärjes-

telmän koordinaattikirjastosta ei ole suunnitelman mukaista koordinaatistoa, on vaihtoehtoina suorittaa joko suunnitelmien muuttamisen sellaiseen koordinaatistoon, joka koneen ohjausjärjestelmässä on, tai vaihtoehtoisesti tehdä paikallinen muunnos.



Kuva 25. Koordinaattijärjestelmien välinen muunnos [11, s. 106.]

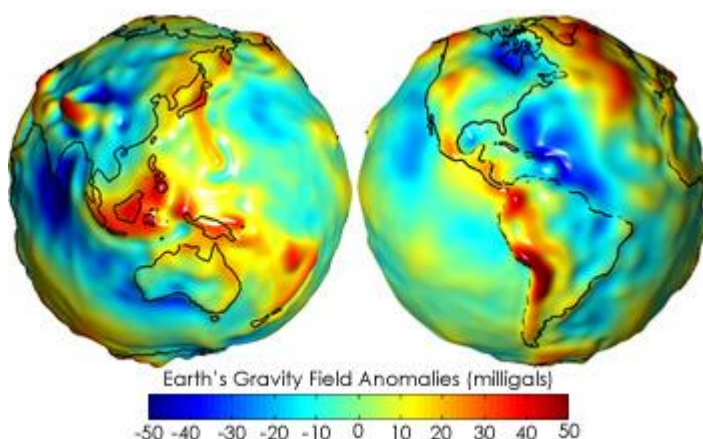
Koordinaattijärjestelmien välinen muunnos on triviaali, eli kyseisessä muunnoksessa ei itsessään tapahdu virhettä. Muunnos tapahtuu selvittämällä järjestelmien origojen erot sekä kiertokulmat jokaista koordinaattiakselia nähden. [11]

Todellisuudessa koordinaattimuunnos joudutaan tekemään kuitenkin lähes aina koordinaatistojen välillä. Muunnos tehdään tällöin esimerkiksi Helmert-muunnoksella, jossa koordinaatisto käännetään järjestelmästä toiseen yhdenmuotoisuusmuunnoksella käyttäen hyväksi sellaisia kiintopisteitä, joiden koordinaatit tunnetaan kummassakin kyseessä olevassa koordinaatistossa. Koska kyseisten tunnettujen kiintopisteiden mittaamisessa tapahtuu aina virhettä, ei yhdenmuotoisuusmuunnos tapahdu koskaan täydellisen yhdenmuotoisesti. GNSS:llä määritettyjen nykyaikaisten koordinaatistojen sisäiset tarkkuudet ovat kuitenkin monta kertaluokkaa vanhoja koordinaatistoja parempia, minkä tähden voidaan sanoa, että modernin ja vanhan koordinaatiston välinen muunnos kuvaa lähinnä vanhan koordinaatiston virheitä. [11; 2.]



### 5.2.2 Korkeusjärjestelmät

Jotta pisteelle voidaan määrittää yksiselitteisen tasokoordinaatin lisäksi yksiselitteinen korkeus, täytyy piste sitoa korkeusjärjestelmään. Korkeusjärjestelmän määrittelyyn kuuluu korkeusdatumi, joka koostuu tasodatumin tavoin joukosta matemaattisia suureita. Nykyisen korkeusjärjestelmät ovat sidottu maan painovoimaan, jonka vertauspintana toimii geoidi. Geoidi on painovoiman tasa-arvopinta, joka kuvaa sitä pintaa johon keskimerenpinta asettuisi kullakin kohdalla maapalloa lepotilassa. Maapallon massa on jakautunut epätasaisesti, jonka johdosta massaansa sidoksissa olevan painovoiman johdosta myös geoidin pinnan taso vaihtelee eri osissa maapalloa (kuva 26). [22]



Kuva 26. Painovoiman tasa-arvopinnan jakautuminen maapallolla [40].

Tasokoordinaatistojen lisäksi Suomessa on yleisessä käytössä vielä useampi eri korkeusjärjestelmä. Virallisesti käytettävä korkeusjärjestelmä on N2000, jonka lisäksi joillakin kaupungeilla sekä vanhoissa suunnitelmissa saattaa korkeusjärjestelmänä olla käytössä N60, N43 sekä NN. [22]

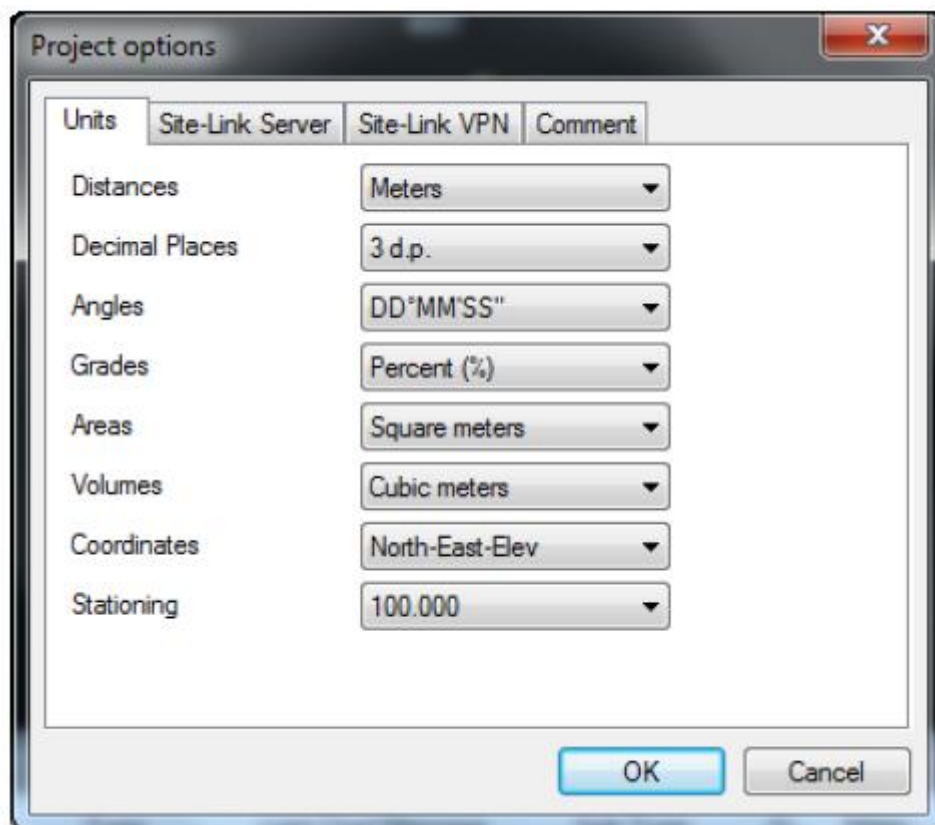
Oikean korkeusjärjestelmän käyttäminen on yhtä tärkeää kuin oikean koordinaatistonkin käyttäminen. N60 ja N2000 järjestelmien väliset korkeuserot vaihtelevat Suomessa 13 senttimetristä aina lähestulkoon 43 senttimetriin (liite 3). Järjestelmien eroavaisuudet johtuvat enimmäkseen jääkauden jälkeisestä maankohoamisesta, joka on huomattavaa etenkin maan länsirannikolla. [22]

Korkeusjärjestelmien väliset muunnokset suoritetaan lähestulkoon aina vakiosiirtymän avulla, jolloin kaikkia toisen järjestelmän mukaisia korkeuksia muutetaan tietyn arvon verran joko ylös tai alaspäin riippuen siitä, kumpaan järjestelmään kyseisiä korkeuksia muutetaan.

### 5.2.3 Paikallisen muunnoksen tekeminen 3D-Officella

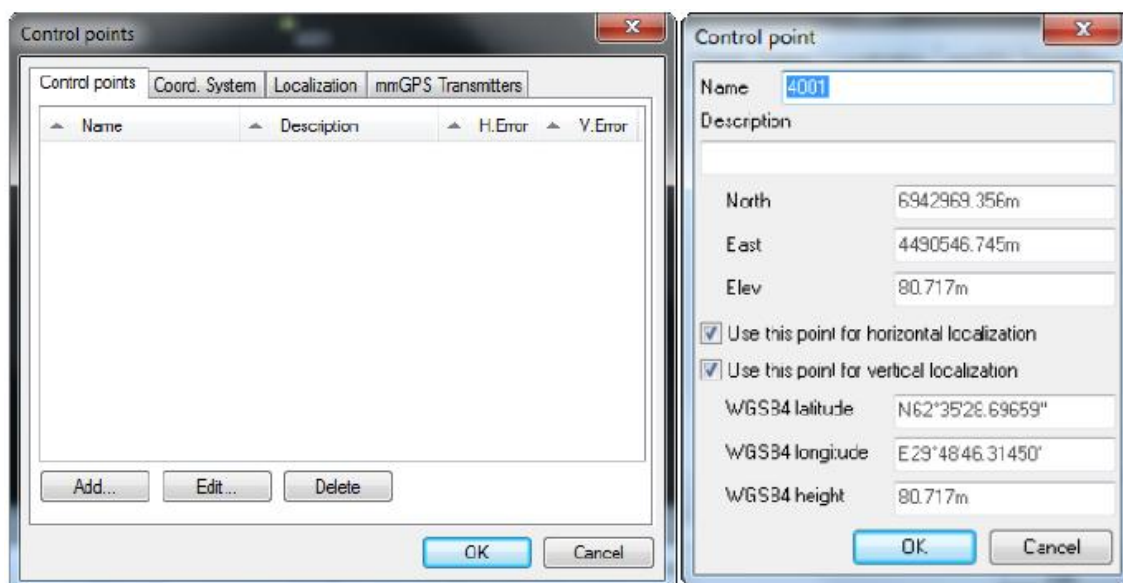
Aina koneohjausjärjestelmien koordinaattikirjastoon määritetyissä koordinaattijärjestelmissä ei ole suunnitelman mukaista koordinaatistoa, tai koneeseen määritetyt koordinaatistot eivät vain toimi kohteessa tarkkuutensa puolesta. Tällöin joudutaan tekemään työmaakohtainen paikallinen muunnos. Teoriassa paikallismuunnoksen tekemiseen tarvitaan kolme pistettä, mutta suuremmalla määrällä pisteitä saadaan parannettua huomattavasti muunnoksen tarkkuutta. Jokaiselle pisteelle tarvitaan paikalliset x-, y- ja h-koordinaatit sekä niitä vastaavat WGS-84-järjestelmän mukaiset koordinaatit, joiden olisi hyvä olla muodossa asteet, minuutit ja sekunnit. Pisteiden olisi hyvä kattaa koko työmaa, parhaassa mahdollisessa tilanteessa sijoittuen sekä työmaan ympärille, että sen sisäpuolelle. [23]

Paikallisen muunnoksen tekeminen työmaalla alkaa työmaalla käytössä olevan koordinaatiston mukaisten kiintopisteiden mittaamisella käyttämällä satelliittipaikanninta. Mittauksen voi suorittaa työmaalla työskentelevä mittaushenkilöstö, jolloin tietomallikoordinaattorin ei välttämättä tarvitse lähteä itse työmaalle suorittamaan mittauksia. Mittauksen jälkeen saadaan tietoon pisteiden koordinaatit sekä työmaan omassa että WGS-84-järjestelmissä. Tämän jälkeen muunnoksen tekeminen 3D-Officessa voi alkaa avaamalla työmaata koskeva projekti ja asettamalla tämän jälkeen projektiasetukset oikein (kuva 27). [23]



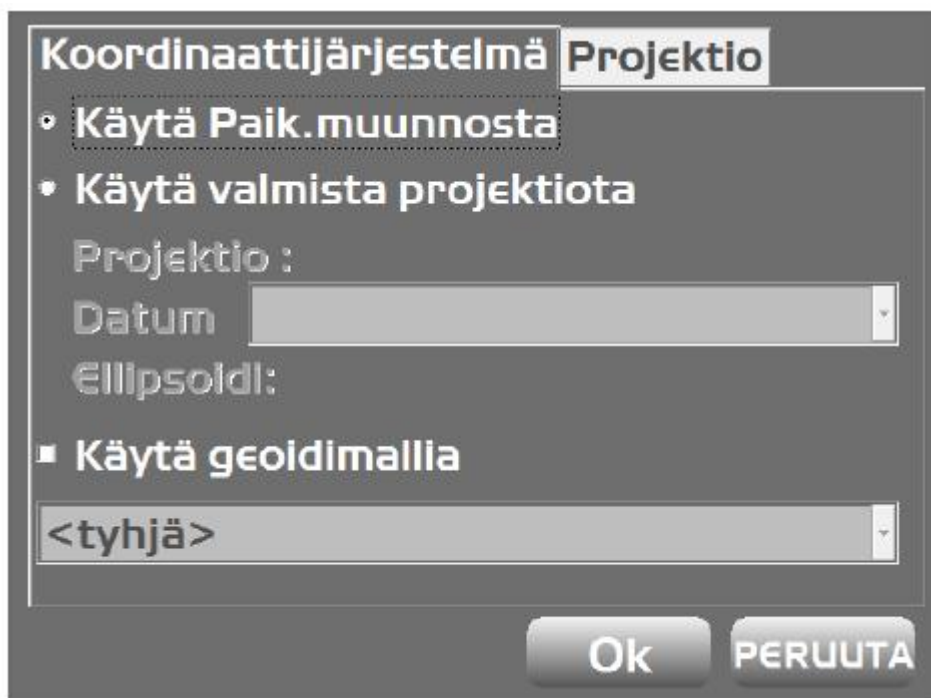
Kuva 27. Projektiasetusten yksiköiden muuttaminen käytössä olevia tietoja vastaaviksi [23].

Kun projektiasetuksen on saatu tarvittaessa muutettua oikeiksi, on seuraavana toimenpiteenä kiintopisteiden syöttäminen ohjelmaan. Syöttäminen tapahtuu Project -> Control points-polun päästä, jolloin aukeaa kuvan 28 mukainen näkymä. Add-valinnasta painamalla päästään antamaan kiintopisteen nimi ja koordinaatit sekä työmaan omassa ja WGS-84 koordinaatistoissa. Jos kiintopisteen koordinaatit tiedetään tarkoiksi, on hyvä jättää päälle horizontal- ja vertical localization-valinnat, jolloin kyseistä kiintopistettä käytetään sekä sekä taso- että pystymuunnoksen laskentaan. [23]



Kuva 28. Kontrolli- eli kiintopisteiden syöttäminen [23].

Kun kaikki mitatut kiintopisteet on saatu syötettyä ohjelmaan, ilmoittaa ohjelma kunkin yksittäisen pisteen horisontaalisen ja vertikaalisen istuvuuden suhteessa muihin käytettyihin pisteisiin. Mikäli jonkun pisteen virheet ovat liian suuria, kannattaa ensimmäisenä toimenpiteenä tarkistaa, ovatko syötetyt koordinaatit oikein. Mikäli koordinaatit on syötetty oikein ohjelmaan, indikoi virheet pisteen sopimattomuutta suhteessa muiden pisteiden koordinaatteihin. Jos pisteellä epäillään tapahtuneen mittausvirhe, on vaihtoehtoina mitata ko. piste uudestaan tai pudottaa se pois muunnoksen laskennasta. Tämän jälkeen muunnostiedot kirjoitetaan ulos ohjelmasta Project - Export Control points - To 3D control file, minkä jälkeen saatu GC3-tiedosto tallennetaan esimerkiksi muistitikun juureen, jonka kautta muunnostiedosto voidaan viedä työkoneelle. Vastaavasti muunnostiedosto voidaan viedä työkoneelle myös Site-Linkin kautta, mikäli kyseinen toiminto on aktivoituna. [23]



Kuva 29. Koordinaattijärjestelmän valitseminen paikalliseksi muunnokseksi [44].

Työkoneen päässä muistitikku kiinnitetään USB liittimeen, jonka jälkeen 3DMC:ssä mennään Tiedosto -> Orientointi, jonka jälkeen muunnostiedosto tuodaan projektiin. Viimeisenä toimenpiteenä 3DMC:ssä valitaan koordinaattijärjestelmä, ja varmistetaan että ohjelma käyttää paikallista muunnosta (kuva 29). [23]

Kun paikallinen muunnos on viety koneohjausjärjestelmälle, on syytä suorittaa tarkistusmittaus käyttämällä esimerkiksi takymetria. Jos kyseessä on esimerkiksi kaivinkone, kannattaa kauhan huulilevyn keskipisteen lisäksi tarkastaa kauhan kumpikin nurkka, sekä tarkastaa kauha sekä vaaka-, että pystyasennossa. Tämän lisäksi olisi hyvä vielä tarkastaa kauha keskeltä, kun puomisto käännetään 180 astetta toiseen suuntaan, jolloin voidaan varmistua koneohjauksen tarkkuuden olevan raja-arvojen puitteissa jokaisessa asennossa. [23]





Yleisesti kaikki pienemmän ja keskisuuren luokan työmaat ovat kooltaan sellaisia, että yksi, keskelle työmaata sijoitettu tukiasema riittää tarjoamaan toimivan korjaussignaalin koko työmaan alueelle (kuva 30). Yhden tukiaseman ratkaisu onkin helpoin ja kustannustehokkain tapa suorittaa kyseisen kokoluokan työmaan koneohjausten paikannusratkaisu. [4]



Kuva 31. Seinäjoen ohikulkutie. Hankkeella on käytössä kaksi tukiasemaa, joille on piirretty 5 kilometrin rajaa kuvaava ympyrä [28].

Valtatiehankkeet puolestaan ovat maarakennustyömaita, joille tyypillinen ominaispiirre on työmaan pitkä ja kapea rakenne. Yksittäinen hanke saattaa olla ääritapauksessa jopa kymmeniä kilometrejä pitkä, jolloin koko työmaata ei voidakaan kattaa vain yhdellä tukiasemalla. Tällöin työmaalle joudutaan pystyttämään useampi tukiasema, jotta työtä työmaan eri osissa voidaan suorittaa yhtäaikaista. Vaikka yksittäisen tukiaseman maksimaalinen toimintaetäisyys olisikin ihanneolosuhteissa jopa 10 kilometriä, tulee useamman tukiaseman tapauksessa vierekkäisten tukiasemien välistä etäisyyttä pienentää, jolloin saavutetaan parempi työmaan sisäinen tarkkuus. Tukiasemien pienemmällä etäisyydellä toisistaan kuin maksimaalinen toimintamatka ton sekin hyöty, että toisen tukiaseman mennessä epäkuuntoon voidaan toista tukiasemaa käyttää ns. vara-asemana [4; 28; 34.]

Työkoneen koneohjauksen paikannussignaalin korjaamiseen käytetään etupäässä lähimmän tukiaseman välittämää korjaussignaalia. Mikäli maasto-olosuhteista johtuen lähimmän tukiaseman tarjoamassa korjaussignaali on häiriöitä tai signaali ei kuulu ollenkaan itse kohteeseen, voidaan paikannuksen korjaamiseen käyttää kyseisessä tapauksessa myös kauempana sijaitsevan tukiaseman välittämää korjaustietoa.[31]

Siirtyminen tukiasemalta toiselle tapahtuu yksinkertaisesti muuttamalla työkoneessa olevan radiomodeemin kanavaa. Yksinkertaisen toimenpiteen voi suorittaa joko työmaalla toimiva mittaustyöntekijä, tai itse koneen kuljettaja. [27; 31.]

### 5.3.2 Tukiaseman pystyttäminen

Tukiasema voidaan pystyttää lähestulkoon mihin paikkaan vain, joka tarjoaa tarpeeksi esteettömän näkymän etenkin eteläiselle taivaankannelle, sijaitsee joko työmaalla tai sen välittömässä läheisyydessä sekä tarjoaa suojaa murtautumisia ja ilkivaltaa vastaan. Tämän lisäksi tukiasema tarvitsee sähköä toimiakseen. Mikäli verkkovirtaa ei ole saatavilla, voidaan tukiaseman virran saanti hoitaa akun ja generaattorin, sekä aurinkopaneelien avulla. Tämän lisäksi tukiaseman kiinnitysalustan tulee olla stabiili, jotta tukiasema ei pääse liikkumaan omia aikojaan. Hyviä tukiaseman sijoittamispaikkoja, jotka täyttävät edellä mainitut kriteerit, voivat olla työmaakopit (kuva 32) tai esimerkiksi lähellä sijaitsevien julkisten rakennuksien kuten kaupungintalojen tai paloasemien katot. [4; 34.]

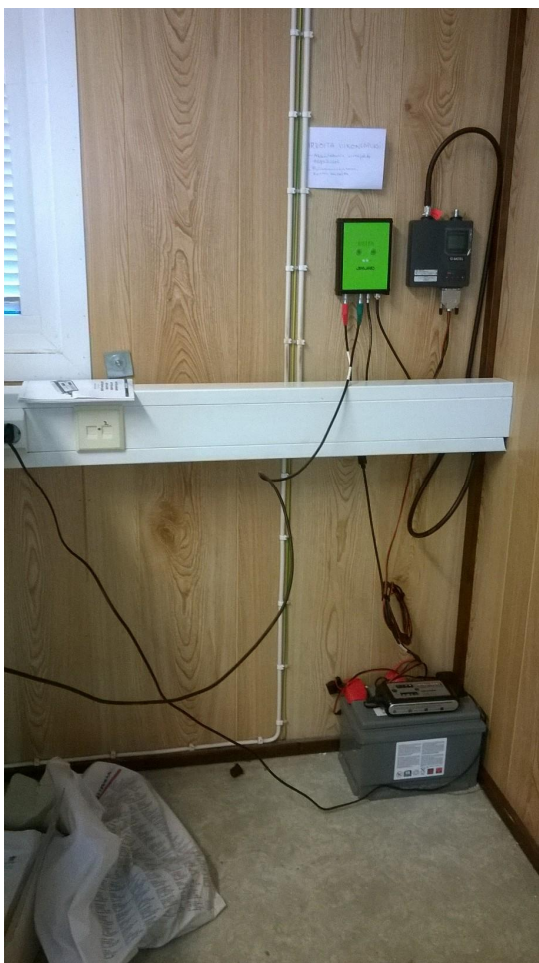




Kuva 32. Tukiasema voidaan muodostaa työmaakopin yhteyteen. Kuvassa näkyvät Javad-merkkisen tukiaseman GNSS-antenni sekä pitempi, valkoinen radion antenni. Kuva Ville-Veikko Laulainen.

Fyysisesti tukiasemapaketti koostuu satelliittipaikannusantennista ja -vastaanottimesta, radiomodeemista sekä radion antennista. Mikäli verkkovirtaa ei ole käytettävissä voidaan tukiaseman virransaanti hoitaa kesäaikaan aurinkopaneelilla ja pilvisen sään sattuessa generaattorilla. Verkkovirran katkeamisen varalle tukiaseman virran saanti voidaan varmistaa akulla. Radiomodeemi, satelliittipaikantimen vastaanotin sekä akku ja laturi tulee sijoittaa sääolosuhteilta suojattuun tilaan. Satelliittipaikantimen antennin paikkaa valittaessa tulee puolestaan huolehtia, että antenni kiinnitetään fyysisesti stabiiliin rakenteeseen eikä se pääse heilumaan esim. kovassakaan tuulessa. Lisäksi antennilta tulisi aueta mahdollisimman esteetön näkymä etenkin eteläiselle taivaalle. Radion antenni kannattaa sijoittaa mahdollisimman korkealle, mikäli työmaalla esiintyy

rinteitä tai muita vastaavia pinnan muodostelmia, jotka saattavat aiheuttaa muussa tapauksessa katvealueita radiosignaaleille. [4; 32; 34.]



Kuva 33. Tukiaseman näkymä työmaakopin sisältä. Kuva Ville-Veikko Laulainen.

Tukiaseman pystyttäminen tapahtuu kiinnittämällä satelliittipaikannusantennin jalusta sekä radion antenni valitun tukiasemapaikan ulkopuolelle (kuva 33). Tämän jälkeen satelliittipaikannusantennilta ja radionantennilta suoritetaan niiden omien kaapeleiden vieminen sääolosuhteilta suojattuun tilaan. Radion kaapeli kytketään kiinni radiomodeemiin, joka puolestaan kytketään kiinni satelliittipaikannusvastaanottoon yhdessä satelliittipaikannusantennilta tulevan kaapelin kanssa. Järjestelmän virtajohto kytketään kiinni vastaanottoon, jonka jälkeen sen toiseen päähän kiinnitetään esim. akun napoihin sopivat liittimet, jotka kytketään kiinni akkuun. Akku kytketään laturin kautta kiinni verkkovirtaan, jolloin mahdollistetaan virtakatkoksen aikana tukiaseman virran saanti akun kautta. [32]

Kun tukiasema on fyysisesti pystyssä ja järjestelmä on kytkettynä päälle, on seuraavana toimenpiteenä kertoa järjestelmälle tukiaseman tunnetun pisteen koordinaatit. Tämä tapahtuu joko kytkemällä tukiasema suoraan kiinni käytettävään tietokoneeseen tai internetin välityksellä. Tukiaseman syöttäminen voidaan tehdä esimerkiksi Javadin omalla PCVIEW- tai Topconin PC-CDU-ohjelmistolla. Koordinaatit syötetään ohjelmistoon configuration -> receiver-polun päästä WGS-84 koordinaatistossa. Muutos hyväksytään, minkä jälkeen tukiasema alkaa lähettämään korjaussignaalia radiomodeemin määrittämällä kanavalla. [32]

#### 5.4 Koneenkuljettajien ja mittaushenkilöstön kouluttaminen yhtenäiseen toimintatapaan työmaalla

Työkoneissa käytettävistä koneohjausjärjestelmistä saadaan suurin hyöty työmaalla irti silloin kun ohjausjärjestelmän paikannustarkkuus on todettu ja dokumentoitu luvussa 7.2 määritetyillä tavoilla sekä koneen kuljettaja osaa käyttää hyväksi koneohjausjärjestelmän mahdollistamia ominaisuuksia mahdollisimman hyvin.

Työmailla mielletään helposti, että koneen kuljettaja hallitsee koneohjausjärjestelmän käytön kiitettävästi, kun hän osaa vaihtaa ohjausjärjestelmän projektitiedostosta tarvitsemansa pintamallin, valita kauhakirjastosta oikean kauhan ja muuttaa tämän käyttämää mittauspistettä, sekä tarkastaa koneen paikannustarkkuuden tunnetulla pisteellä. Niillä taidoilla hallitaankin ohjausjärjestelmän peruskäyttö, joka mahdollistaa esimerkiksi rakennekerroksien työstämisen mallikkaasti.

Yksi koneohjauksen suurimmista hyödyistä on työkoneen mahdollisuus suorittaa itse toteumamittaukset tekemässään työljäljestä. Valitettavan usein koneen kuljettajan tietämättömyys toteumamittauksen tekemisestä johtaa puutteelliseen toimintatapaan, jolloin rakennettavista kerroksista puuttuu toteumatieto tarpeellisista kohdista tai pahimmassa tapauksessa toteumatietoa ei ole kerätty lainkaan.

Koneen kuljettajien ammattitaitoa koneohjausjärjestelmän hyödyntämisessä ja toteumamittausten tekemisessä voidaan parantaa merkittävästi pitämällä koulutustilaisuus ennen varsinaisen rakentamisen aloittamista, jossa käydään läpi koneohjaukseen liittyvät perusasiat sekä kuinka toteumamittaus työkoneella tulisi suorittaa oikeaoppisesti. Lisäksi koulutuksessa voidaan käydä läpi työmaakohtaisia erityispiirteitä ja sitä, kuinka niiden kanssa toimitaan. [31]

Koulutukseen kannattaa sisällyttää seuraavat aihealueet:

- Oikean kauhan valitseminen kauhakirjastosta sekä kauhan mittapisteen merkitys ja muuttaminen järjestelmän paikantamisen kannalta.
- Eri kerroksia kuvaavien pintamallien valitseminen järjestelmästä.
- Koneen mittapisteen sijainnin tarkastaminen ja tarkkuuden dokumentointi mittaamalla tunnetulla tarkastuspisteellä.
- Radiomodeemin kanavien vaihtaminen
- Toteumamittausten tekemisen periaatteet.

Koulutuksen lisäksi työkoneiden kuljettajille olisi hyvä luoda tiivistetty ohjekirjanen koulutuksessa käydyistä asioista, sillä valtaosa koulutukseen osallistuvista henkilöistä ei kuitenkaan kykene sisäistämään kaikkia asioita kerralla. Ohjekirjan avulla työkoneen kuljettaja pystyy itsenäisesti ratkaisemaan enimmäkseen ongelmat työmaalla, jolloin itse rakentamiseen ei pääse syntymään turhia odotusaikoja.

## 6 Koneohjausjärjestelmän asennus ja kalibrointi

Markkinoilla on tällä hetkellä useiden eri valmistajien tuottamia koneohjausjärjestelmiä. Suomen koneohjausmarkkinoilla suurimpia toimijoita ovat amerikkalainen Topcon, suomalainen Novatron, itävaltalainen Leica sekä ruotsalais-amerikkalainen Trimble. Eri valmistajien koneohjausjärjestelmässä on pääpiirteittäin samat komponentit, mutta niiden asennusmetodeissa saattaa olla pieniä eroavaisuuksia. [6]

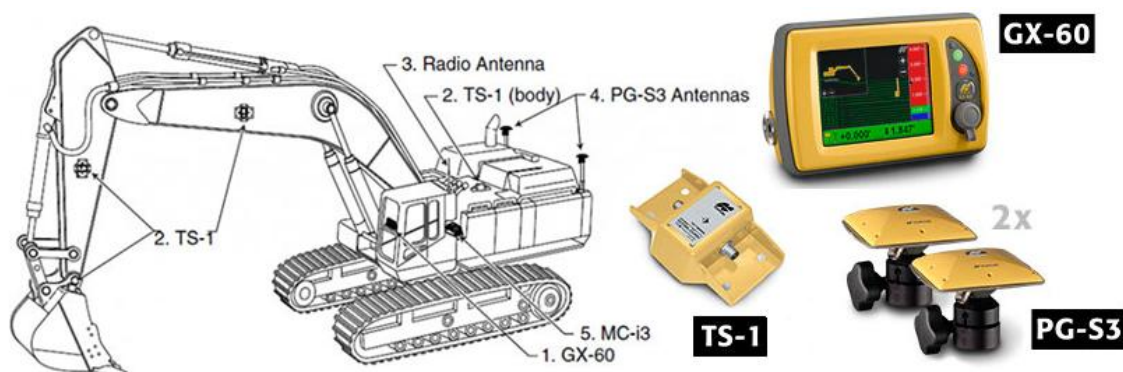
Kaivinkoneiden opastavat 3D-järjestelmät ovat yleisimmät työmailla esiintyvät koneohjausjärjestelmät, ja kaikkien valmistajien mallit koostuvat hyvin pitkälti samankaltaisista kokonaisuuksista ja komponenteista. Tietomallikoordinaattorin toimenkuvaan voi hyvin kuulua työmaalle tulevien koneohjausjärjestelmien asentaminen ja kalibroiminen työkoneisiin. Tämän vuoksi kyseisessä tehtävässä toimivan henkilön tulisi ymmärtää hyvin koneohjauksen toimintaperiaate sekä hallita järjestelmän asennus hyvin ainakin yhden laitevalmistajan komponenteilla.

Tässä työssä esitellään Topgeo Oy:n myymän Topconin kehittämän X63i-opastavan kaivinkoneen 3D-ohjausjärjestelmän asennustoimenpiteet sekä kalibrointi.

## 6.1 Topcon X63i -koneohjausjärjestelmä

Topcon X63i (kuva 34) tarvitsee toimiakseen seuraavat komponentit [24; 25; 30]:

- 4–5 kpl TS-1-inertianmittausalustaa riippuen siitä, käytetäänkö kaivinkoneessa vaihtelevasti sekä kiinteää että irrotettavaa kauhan sivuttaiskallistusta säätelevää mekanismia.
- 2 kpl PG-3 satelliittipaikannusantennia.
- 1 kpl GX60, värillinen kosketusnäyttö.
- 1 kpl MC-i3 GNSS-vastaanotin sekä 1 kpl radiomodeemi.
- 1 kpl radioantenni.



Kuva 34. Topcon X63-i -kaivinkoneen opastavan koneohjausjärjestelmän komponentit [25].

Tämän lisäksi mikäli ohjausjärjestelmässä paikannusmenetelmänä tullaan käyttämään esim. VRS-RTK:ta, tarvitsee järjestelmä vielä:

- 1 GSM-antenni.
- SIM-kortin, joka sijoitetaan MC-i3:n sisällä olevaan kortinlukijaan. [30]

Tämän lisäksi kokoonpanoon kuuluu CAN-väyläkaapeleita, satelliittiantennien jalustat, inertianmittausalustojen kiinnityspultit sekä muita vastaavia tarvikkeita.

## 6.2 Topcon X63i:n asentaminen kaivinkoneeseen

Kun koneohjausjärjestelmää asennetaan kaivinkoneeseen, ei ole olemassa yhtä ainoaa oikeaa lähestymistapaa, vaan jokainen henkilö kehittää oman tapansa hoitaa asennus tietyssä järjestyksessä. Tärkeintä on, että ohjausjärjestelmän komponentit ovat sijoitettuna oikeille paikoille siten, että niiden vaurioitumisriski olisi mahdollisimman pieni. Tämän lisäksi esim. inertianmittausanturoiden sijoittamiseen vaikuttavat mm. käytössä olevien CAN-väyläkaapeleiden pituus sekä muutama kiinnitysasentoon liittyvä rajaehto, jotka selviävät myöhemmin tässä luvussa. Seuraavaksi esitellään yksi mahdollinen, hyväksi koettu menetelmä kaivinkoneen koneohjausjärjestelmän asentamista varten. [30]

Kun X63i-ohjausjärjestelmää aletaan asentaa kaivinkoneeseen, on ensimmäisenä toimenpiteenä hyvä selvittää, minkälaisia mahdollisuuksia koneen ohjaamosta on hoitaa GX60-näytölle tulevien virta- ja CAN-väyläkaapeleiden läpivienti ohjaamon takana sijaitsevaan lokerotilaan (kuva 35). Useasti kaivinkoneen hytissä on valmistajasta riippumatta valmiina erilaisia ja erikokoisia aukkoja muun muassa koneen omien virtajohdosten ym. läpivientiä varten. Valmiita läpiviennin aukkoja kannattaa käyttää hyväksi myös koneohjausjärjestelmän kaapeleiden läpiviennissä. GX60:n kaapeliyhdistelmän läpivieminen vaatii halkaisijaltaan n. 5 senttimetrin kokoisen aukon, johtuen virtakaapelin 90° kulmalla varustetusta liittimestä. Esimerkiksi Caterpillar CAT 324E-kaivinkoneessa on lattiassa, kuljettajan penkin takapuolella valmiit reiät koneen omien virtajohtojen läpivientiä varten, jotka ovat tarpeeksi suuria GX60-kaapeliyhdistelmälle. Kyseisen kaapeliyhdistelmän syöttäminen kohti hyttiä kannattaa aloittaa hytin takana sijaitsevasta lokerosta, jatkaen koneen alla olevia tiloja hyödyntäen kohti kyseisiä läpiviennin aukkoja. Kaapeleita syötettäessä tulee muistaa hoitaa syöttäminen sellaista reittiä pitkin, että kaapelit eivät pääse hankautumaan rikki teräviä rakenteita vasten. Kaapelit eivät saa myöskään muodostaa rungon ulkopuolelle lenkkejä, jotka voisivat tarttua ulkopuolisiin objekteihin, rikkoen kaapelit tämän seurauksena. [30]

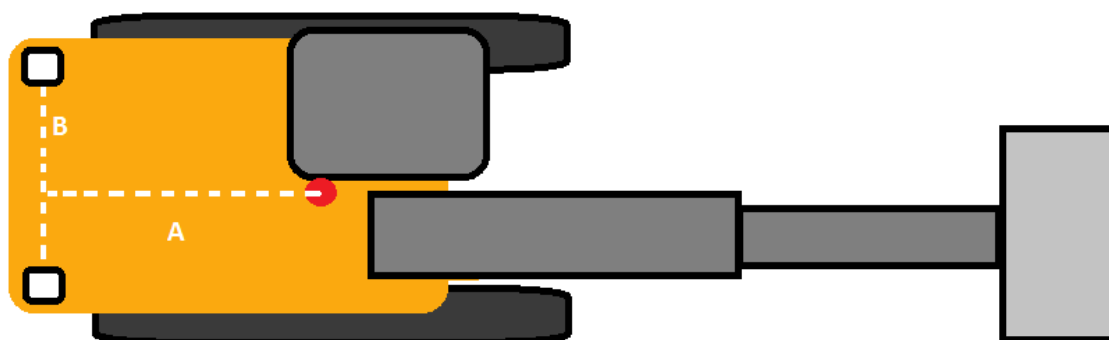




Kuva 35. Kaivinkoneissa ohjaamon takana olevassa tilassa (punainen ympyrä) on ihanteellinen sijoituspaikka koneohjausjärjestelmän GNSS vastaanottimelle sekä radio modeemille. Kuva Ville-Veikko Laulainen.

Kun kaapelien päät on saatu syötettyä koneen hyttiin, kannattaa loppumatkan syöttö hoitaa koneen lattiamaton alla koneen hytin oikeanpuoleista reunaa pitkin. Itse näyttö tullaan sijoittamaan yleisimmin hytin oikeaan etukulmaukseen sellaiselle korkeudelle, jotta koneen kuljettaja pystyy seuraamaan sujuvasti ja ergonomisesti sekä itse kaivuutyötä että näyttöä työn ohessa. Tämän vuoksi onkin hyvä varmistaa, että hyttiin tuotu kaapeliyhdistelmä ylettää tarpeeksi korkealle. Siksi onkin hyvä suorittaa itse näytön asennus samanaikaisesti kaapeleiden läpiviennin yhteydessä. Näytön kiinnitysjalusta kiinnitetään hytin sisäseinään kiinni sopivalle korkeudelle. On hyvä huomata, että kiinnitysjalustan varressa ei ole erillisiä niveliä, jotka mahdollistaisivat varren kääntelemisen parempaa asentoa varten. Tätä ongelmaa voidaan kompensoida pitämällä mukana erilaisia metallisia aluslevyjä, joiden avulla kiinnitysjalustan kulmaa voidaan muuttaa paremmin istuvaksi. Itse näyttö kiinnittyy jalustan päässä olevaan palloniveleen yksinkertaisesti kiristämällä kiinnitysruuvi tiukasti kiinni. Kaapeleiden liittimet kiinnitetään kiinni näytön takana sijaitseviin liittimiin. [30]

Kun näyttö ja sen kaapelit on saatu asennettua kaivinkoneen hyttiin, voidaan seuraavaksi alkaa selvittämään järjestelmän satelliittiantennien mahdolliset sijainnit. Antennien kiinnityspaikkaa etsiessä on hyvä muistaa, että järjestelmän tarkkuus on sitä parempi, mitä kauempana koneen pyörimiskeskistä antennit sijaitsevat (kuva 36). Lisäksi antenneille tulisi aueta mahdollisimman esteetön näkyvyys satelliittitaivaalle ja olla samanaikaisesti mahdollisimman hyvin suojassa kolhuilta ja iskuilta. Tämän johdosta yleisesti hyväksi antennien sijoituspaikaksi on todettu koneen takana sijaitsevan moottoritilan päällinen. [30]



Kuva 36. Järjestelmän satelliittipaikannusantennit tulee sijoittaa mahdollisimman etäälle koneen pyörimiskeskistä tarkkuuden parantamiseksi.

Antennien kiinnittäminen tähän nimenomaiseen paikkaan ei kuitenkaan aina onnistu johtuen kaivinkoneen itsensä aiheuttamista fyysisistä rajoitteista. Yleensä tämä ongelma esiintyy sellaisten kaivinkonemallien kanssa, joissa on lyhyt takaosa. Tällöin antennille tulee etsiä vaihtoehtoinen sijainti, joka voi olla esimerkiksi pääantennille koneen hytin takana sijaitsevalla tasanteella. Kaivinkoneen vastakkaiselle sivustalle sijoitettava antenni on ns. kakkosantenni, jonka tehtävänä on ottaa käytännössä vain havaintoja koneen pyörimissuunnan selvittämiseksi. Tämä antenni voidaan tarvittaessa kiinnittää vaikkapa kaivinkoneen päällä sijaitseviin kaiteisiin, mikäli ne on vain kiinnitetty tarpeeksi tukevasti (kuva 37). [30]





Kuva 37. Vaihtoehtoisia kiinnitysvaihtoehtoja järjestelmän satelliittipaikannusantenneille. Kuva Ville-Veikko Laulainen.

Kun antennit on saatu kiinnitettyä fyysisesti koneeseen, voidaan seuraavaksi suorittaa niiden omien kaapeleiden syöttäminen samaiseen tilaan, josta näytön kaapeleiden syöttäminen aloitettiin järjestelmän asentamisen aluksi. Kuten jo aiemmin todettiin, kaapeleiden syöttämiselle ei ole olemassa yhtä ainoaa oikeaa reittiä, vaan toimenpide on suunniteltava aina tapauskohtaisesti siten, että kaapelit kulkisivat mahdollisimman suojaista reittiä määränpäähänsä. Kaapelia asentaessa kannattaa se kiinnittää suhteellisen tiuhaan esim. nippusiteillä koneen omiin osiin, jolloin estetään lenkkien muodostuminen ja kaapelin liikkuminen koneen työskennellessä. [30]



Kuva 38. Radion (punainen) ja gsm:n (sininen) antennit asennettuina koneen hytin katolle. Kuva Ville-Veikko Laulainen.

Radio- ja gsm-antennien asennus kannattaa hoitaa samanaikaisesti GNSS-antennien asennuksen kanssa, jotta kaapeleiden syöttö voidaan hoitaa samanaikaisesti. X63-i-kokoonpanon mukana tulevat radio- ja gsm-antennit on helppo asentaa esimerkiksi ohjaamon katolle, sillä molempien kiinnityisperiaatteena on voimakas magneetti (kuva 38). Ohjaamon katto on sijainniltaan suotavin sijoituspaikka ennalta mainituille, koska sieltä aukeaa paras ja esteettömin yhteys koneelta. [30]

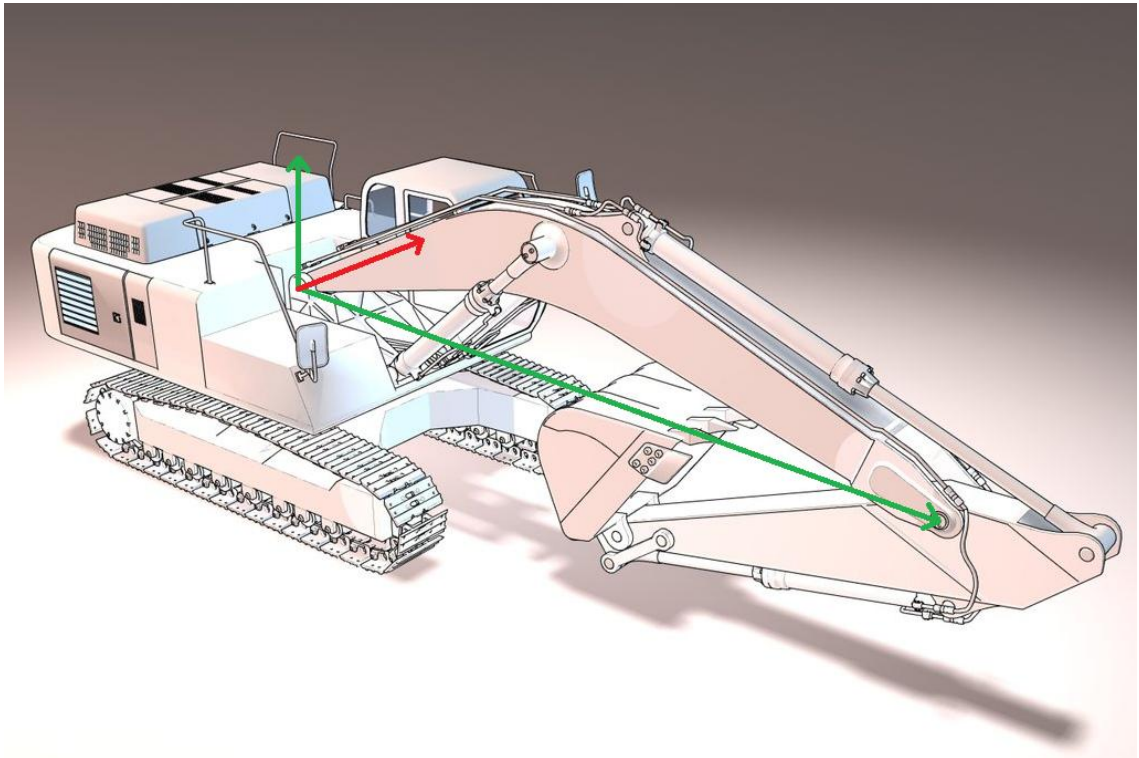
Seuraavana työvaiheena järjestelmän asentamisessa on inertianmittausalustojen kiinnittäminen koneeseen. Yksinkertaisimmillaan tämä toimenpide voidaan hoitaa poraamalla n. 1 millimetrin anturoiden kiinnityspultteja pienemmät reiät koneen runkoon ja puomeihin, joihin luodaan tämän jälkeen oikean kokoiset ja malliset kiertet kierretangolla. Kaikki työkonvalmistajat eivät kuitenkaan salli ylimääräisten reikien poraamista

työkoneeseen. Tässä tapauksessa anturit tulee kiinnittää erilliseen aluslevyyn, joka hitsataan tämän jälkeen kiinni koneen runkoon tai puomeihin.



Kuva 39. TS-1-inertianmittausalusta [41].

TS-1-inertianmittausanturoiden kiinnittäminen kannattaa aloittaa runkoanturista. Nimensä mukaisesti anturi kiinnitetään suoraan koneen runkoon, ja sen tehtävänä on havaita koneen rungon pituus- ja sivuttaissuuntaisia kallistuksia. TS-1-antureita asentaessa on hyvä huomata, että niiden kiinnitysasennoilla on merkitystä konetta kalibroitaessa. Kuvassa 39 hyvin näkyvällä nuolella anturin kyljessä ilmaistaan suunta, joka kerrotaan kalibroinnin yhteydessä ohjausjärjestelmän tietokoneelle. Tämän takia antureita asentaessa hyvä muistisääntö on, että ne kannattaa suunnata aina nuoli joko suoraan ylös tai eteenpäin kohti koneen kauhaa. Tämän jälkeen kalibroinnin yhteydessä on helppo muistaa, mihin suuntaan kukin asennetuista antureista osoittaa. [30]



Kuva 40. Kaivinkoneen koordinaattiakselit. Vihreällä akselilla on ilmaistu runkoanturin oikeaoppinen suuntaus, punaisella virheellinen toteutus [42].

Runkoanturin suuntauksessa on tärkeää, että anturi on suorakulmaisesti itse koneeseen nähden, eli nuoli osoittaa joko ylös tai eteenpäin (kuva 40). Mikäli anturi asennetaan vinottain edellä mainittuun koordinaattiakselistoon nähden, mallintaa kone anturin mittaamat inertianmuutokset virheellisesti. Yleisin kiinnityspaikka kyseiselle anturille lienee koneen seinämässä lähellä koneen hyttiä ja pääpuomin kiinnitystappia (kuva 41). Kyseiseltä sijoituspaikalta on helppo hoitaa CAN-väyläkaapeleiden syöttäminen hytin takana sijaitsevaan lokeroon ja puomia pitkin kohti seuraavaa anturia. [30]

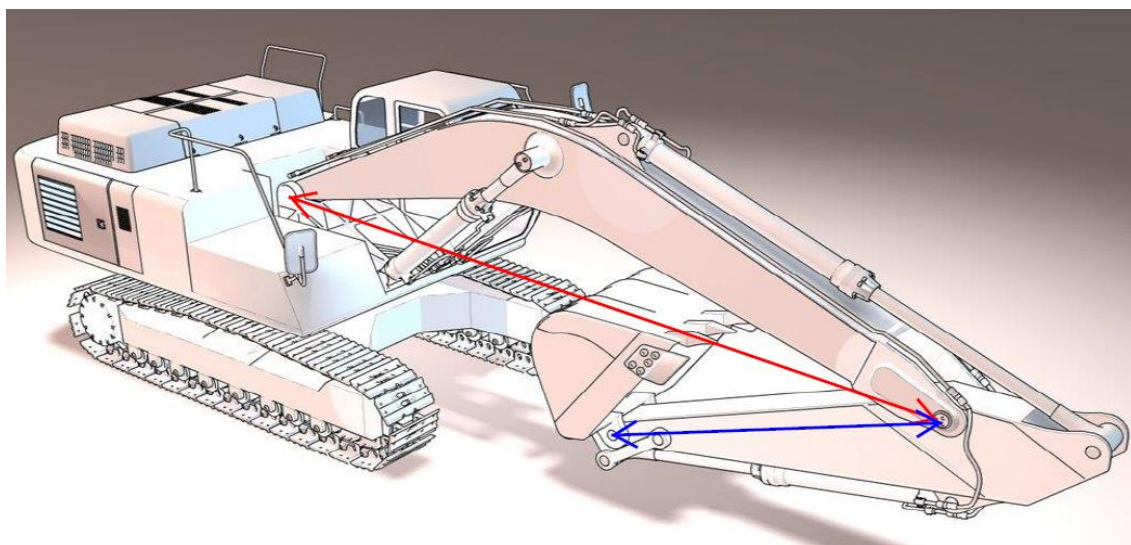


Kuva 41. Runkoanturi kiinnitettyä kaivinkoneen runkoon suuntausnuoli ylöspäin. Kuva Ville-Veikko Laulainen.

Inertianmittausalustat yhdistetään toisiinsa ja ohjausjärjestelmän tietokoneeseen CAN-väyläkaapeleiden avulla. Kyseisiä kaapeleita on saatavilla eripituisina vaihtoehtoina, ja asennuksessa käytettävien CAN-väyläkaapeleiden pituudet kannattaa valita asennuksen kohteena olevan kaivinkoneen dimensioiden mukaan siten, että eri inertianmittausalustojen välille jäisi mahdollisimman vähän piilotettavaa ns. ylimääräistä kaapelia. Tämän vuoksi aina seuraavan anturin kiinnityspaikkaa miettiessä kannattaa katsoa, mihin asti edelliseltä anturilta tuleva CAN-väyläkaapeli ylettyy ja sijoittaa uusi anturi tälle kohdalle mahdollisuuksien mukaan. [30]



Runkoanturin ja pääpuomin välinen CAN-väyläkaapeli kannattaa syöttää pääpuomin yläpintaa pitkin, koska kyseisen puomin päällä kulkee myös useita koneen omia hydraulikkaputkia ja johtoja, joihin CAN-väyläkaapelit saadaan kätevästi kiinnitettyä nipusiteilla. Itse anturi asennetaan pääpuomin kylkeen siten, että kyljessä oleva nuoli osoittaa teenpäin kauhaa kohti. Tämän lisäksi asennuksessa tulee anturia kiinnittäessä ottaa huomioon tappilinja, jolla pääpuomi kiinnittyy runkoon ja kaivuvarteeseen (kuva 42, punainen nuoli). Anturi tulee asentaa tappilinja suuntaisesti siten, että anturin suunta-poikkeama kyseiseltä linjalta on enintään  $\pm 5^\circ$ . Asennuksen suuntauksen apuna voidaan käyttää apuna esim. tasolaseria tai takymetria. [30]



Kuva 42. Kaivinkoneen asennuksessa olennaiset kiinnitystappilinjat [42].

Kaivuvarren anturin asennusta koskevat samat ohjeistukset kuin pääpuomin anturia. Anturi tulee kiinnittää kaivuvarren kylkeen nuoli kohti kauhaa siten, että poikkeama tappilinjalta, joka muodostuu kaivuvarren ja pääpuomin sekä kauhan kiinnitystappien väliin, on enintään  $\pm 5^\circ$ . Kuvassa 42 tätä linjaa kuvaa sininen nuoli.

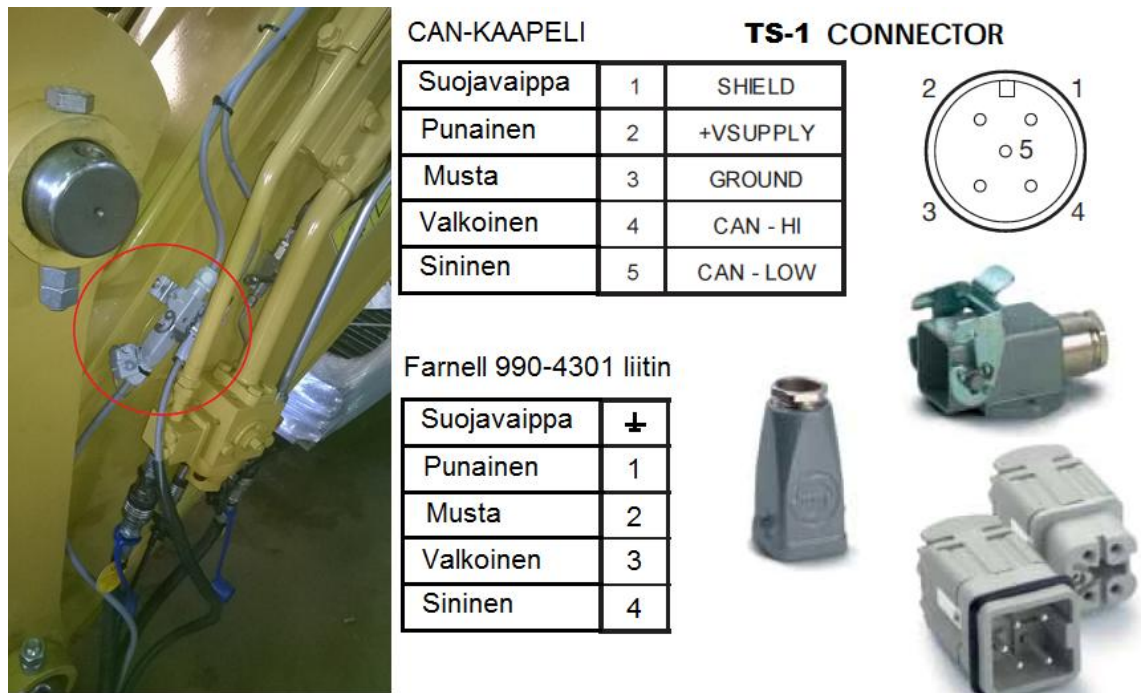
Kauhan anturin kiinnityspaikka riippuu siitä, käytetäänkö koneessa irrotettavaa kauhan kallistamiseen käytettävää hydraulista niveltä vai ei. Mikäli kyseistä komponenttia ei tulla käyttämään, kiinnitetään kauhan anturi suoraan koiranluun kylkeen. Tässä tapauksessa kiinnittäminen kannattaa hoitaa hitsattavan aluslevyn avulla, sillä koiranluuhun ei ole yleensä hyvä porata ylimääräisiä reikiä, jotta sen kestävyys ei heikentyisi. [30]

Mikäli kaivinkoneessa tullaan käyttämään irrotettavaa kauhankallistinta, johtaa se kauhan anturin asennuksessa lisätoimenpiteisiin. Koiranluun sijasta anturi tullaan kiinnittämään suoraan irrotettavaan kallistajaan. Kuvassa 43 anturi on asennettu suoraan Engcon-merkkisen kallistajan suojalevyn alapuolelle, jossa se on parhaiten suojassa kolhuilta koneen kaivuun aikana. Anturin nuolen tulee osoittaa tässä tapauksessa eteenpäin kohti kauhan huulilevyä. [30]



Kuva 43. Kauha-anturi kiinnitettynä engconin suojalevyn alle. Kuva Ville-Veikko Laulainen.

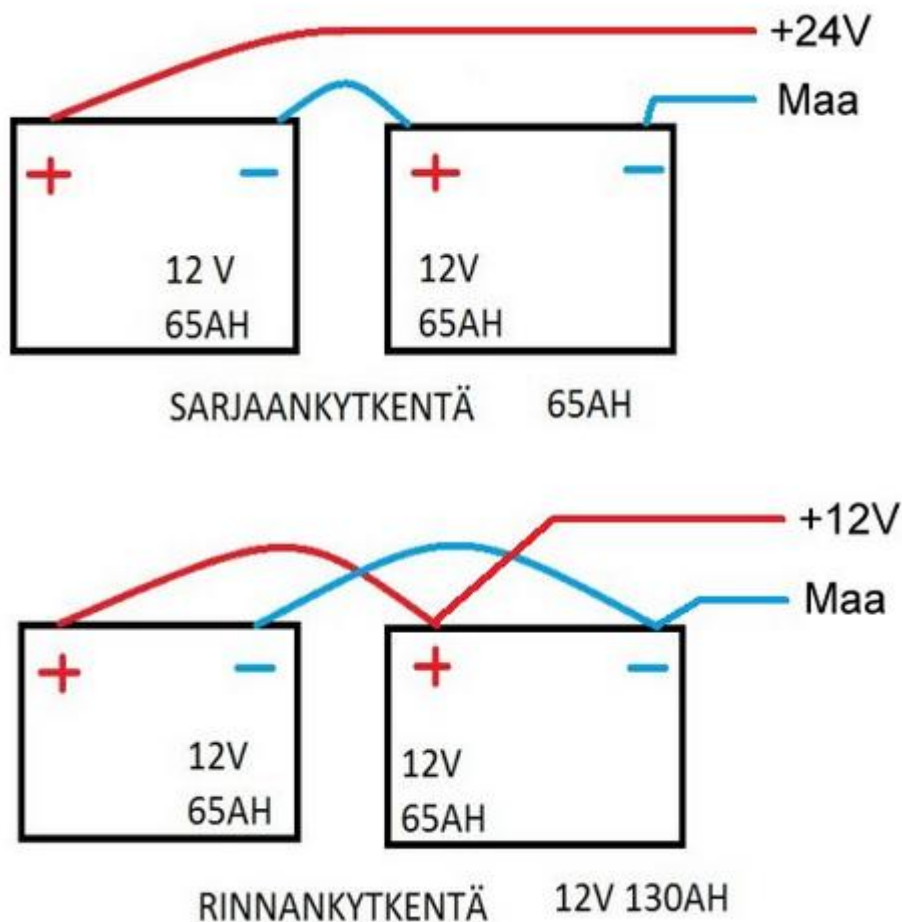
Koska irrotettavan kauhankallistajan ideana on, että sitä voidaan vaihtaa nopeasti eri koneiden välillä työmaalla, tulee myös CAN-väyläkaapeliin tehdä pikaliitin nopean irrottamisen ja uudelleenliittämisen mahdollistamiseksi. Pikaliitintä tehdessä tulee noudattaa Topconin omaa liitäntäkaaviota (kuva 44). KytKentäkaaviota on erittäin tärkeä noudattaa, jotta irrotettava laite toimii oikein myöskin muissa kuin työn alla olevassa kaivinkoneessa. [30]



Kuva 44. Pikaliittimen tekeminen CAN-väyläkaapeliin. Kuvat Ville-Veikko Laulainen, Jouni Mäki-Tulokas Topgeo Oy.

Kun kaikki anturit on saatu kiinnitettyä koneeseen sekä kytkettyä toisiinsa, on aika kiinnittää MC-i3 ja radiomodeemi koneen ohjaamon takana olevan lokeron seinälle sellaiseen paikkaan, jossa ne eivät ole muiden koneen komponenttien tiellä. GSM-antennin kaapeli kytketään kiinni radiomodeemiin, joka kytketään tämän jälkeen kiinni MC-i3:een. Satelliittipaikannusantennit sekä runkoanturilta tuleva CAN-väyläkaapeli kytketään myös kiinni MC-i3:een. Tämän jälkeen viimeinen asennukseen liittyvä toimenpide on kytkeä koneohjausjärjestelmät virtajohdot kaivinkoneen omaan sähköjärjestelmään. [30]





Kuva 45. Akkujen kytkennät [43].

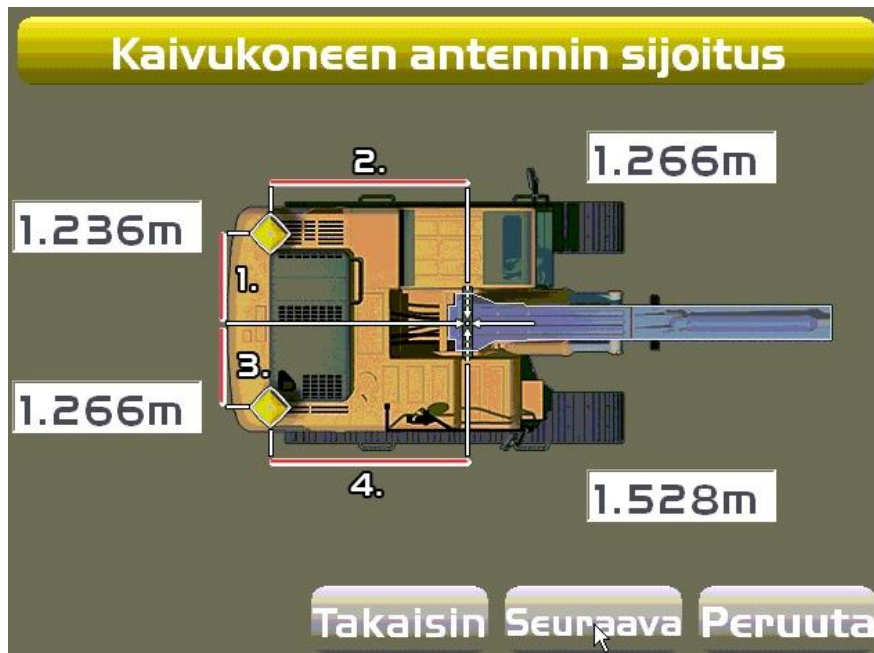
Virtajohtojen kytkemisessä koneen omaan virtajärjestelmään on äärimmäisen tärkeää selvittää, mikä on koneen akkujärjestelmän tuottama jännite. Tämä saadaan selville selvittämällä akkujen kytkemisperiaate (kuva 45). Kaivinkoneen kokoisen työkoneen virtajärjestelmä muodostuu aina useammasta akusta, jotka voidaan kytkeä joko sarjaan, rinnakkain, tai sekä että. Esimerkiksi kaivinkoneen neljästä akusta saattaa olla kytkettynä rinnakkain kaksi kertaa kaksi 12 voltin ja 65 ampeeritunnin akkua, jotka on kytketty tämän jälkeen vielä sarjaan keskenään. Kyseisellä kytkennällä saadaan muodostettua koneen virtajärjestelmän kokonaisjännitteeksi 24 voltia ja 130 ampeerituntia. Kyseisessä tapauksessa koneohjausjärjestelmän +merkkinen virtajohto tulee kytkeä sellaiseen kohtaan koneen sähköjärjestelmää, jossa kyseiset 24 voltia ja 130 ampeerituntia täyttyvät. Miinusmerkkinen pää maadoitetaan koneen päävirtakytkimen yhteyteen. [30]

### 6.3 Järjestelmän kalibroiminen

Kaivinkoneen koneohjausjärjestelmän kalibroiminen voidaan tehdä käyttämällä hyväksi tasolaseria, luotilankoja sekä rullamittaa. Järjestelmän kalibroiminen on kuitenkin edellä mainituilla työvälineillä hyvin työläs toimenpide, tarkkuuden ollen samalla parhaimmillaan senttimetriluokkaa huolellisimmallakin työtavalla suoritettuna. Tämän vuoksi järjestelmän kalibrointi kannattaakin suorittaa käyttämällä takymetria, jolloin kaivinkoneen oleellisten pisteiden koordinaatit ja niiden väliset dimensiot saadaan selvitettyä käytännössä millimetritarkkuudella. [30]

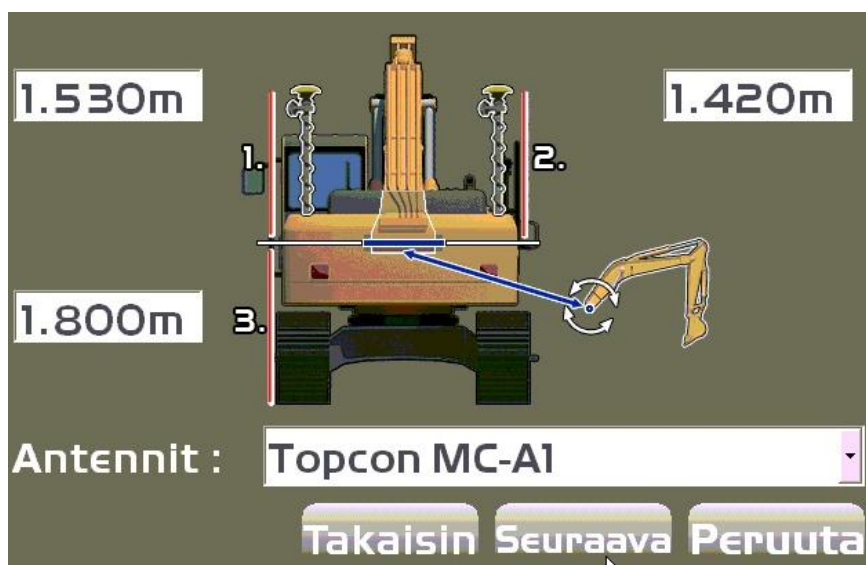
Kaivinkoneen kalibroimiseen liittyvien dimensioiden selvittäminen kannattaa aloittaa mittaamalla työkoneen pääpuomin ja kaivuvarren keskilinja. Tämä voidaan mitata joko suoraan prismaa käyttäen pääpuomin ja kaivuvarren keskeltä, mikäli tämä on mahdollista. Mikäli puomien päällä kulkevat hydraulikkajohdot ja putket estävät mittaamisen suoraan puomin keskeltä, voidaan keskilinja selvittää mittaamalla puomin reuna, jonka jälkeen laskennalla lasketaan uusi piste sivumitan avulla puomin keskelle. Havainnot kannattaa tehdä mahdollisimman etäällä toisistaan, jolloin saadaan tarkempi ja luotettavampi keskilinjan tulos. [30]

Seuraavana toimenpiteenä on GNSS-antennien sijainnin mittaaminen. Antennien jalustoista mitataan antennien kiinnitysruuvin yläpinnan keskikohta, ennen toimenpidettä antennit ovat luonnollisesti irrotettu kyseisistä kiinnitysruuveista. Myös koneen pyörimiskeskipisteen keskeltä tulee ottaa mittaushavainto. Tämän jälkeen mitataan pääpuomin ja rungon sekä pääpuomin ja kaivuvarren välisten kiinnitystappien keskikohdat. Viimeisenä mitattavana kohteena on kauhan ja kaivuvarren kiinnitystapin keskipiste sekä kuvassa 46 näkyvä kiinnitystappi, jonka suhteen kauhan sivuttaiskallistaminen tapahtuu. [30]



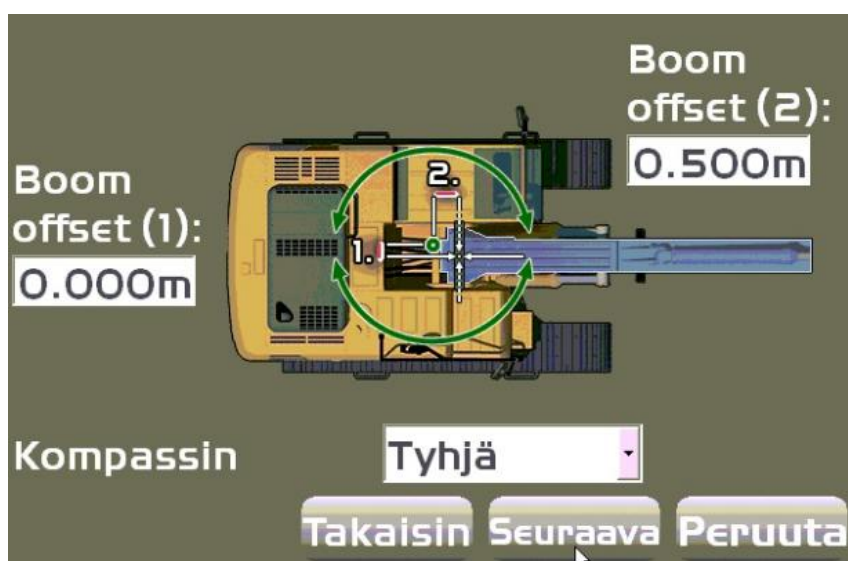
Kuva 46. GNSS-antennien sijainti sidotaan a- ja b-mittojen avulla kaivinkoneen oleellisiin komponentteihin [44].

Kun kaikki oleelliset tiedot on saatu mittaamalla selvitettyä, voidaan mittaustiedosto avata esimerkiksi 3D-Win-ohjelmalla, jonka avulla pistetiedoista on helppo selvittää halutut työkonene mitat. GNSS-antennien sijainnin selvittäminen tapahtuu a- ja b-mittojen avulla. A-mitan avulla selvitetään kummankin antennin kohtisuora etäisyys koneen pääpuomin ja rungon yhdistävän kiinnitystapin keskikohdasta. B-mitalla puolestaan selvitetään antennien sivuttaissuuntainen poikkeama koneen puomien keskilinjasta. Kuvassa 46 GNSS-antennien a-mittoja kuvaa koneen mitat 2 ja 4, b-mittoja koneen mitat 1 ja 3. Saadut tulokset syötetään koneohjausjärjestelmään millimetritarkkuudella. [30]



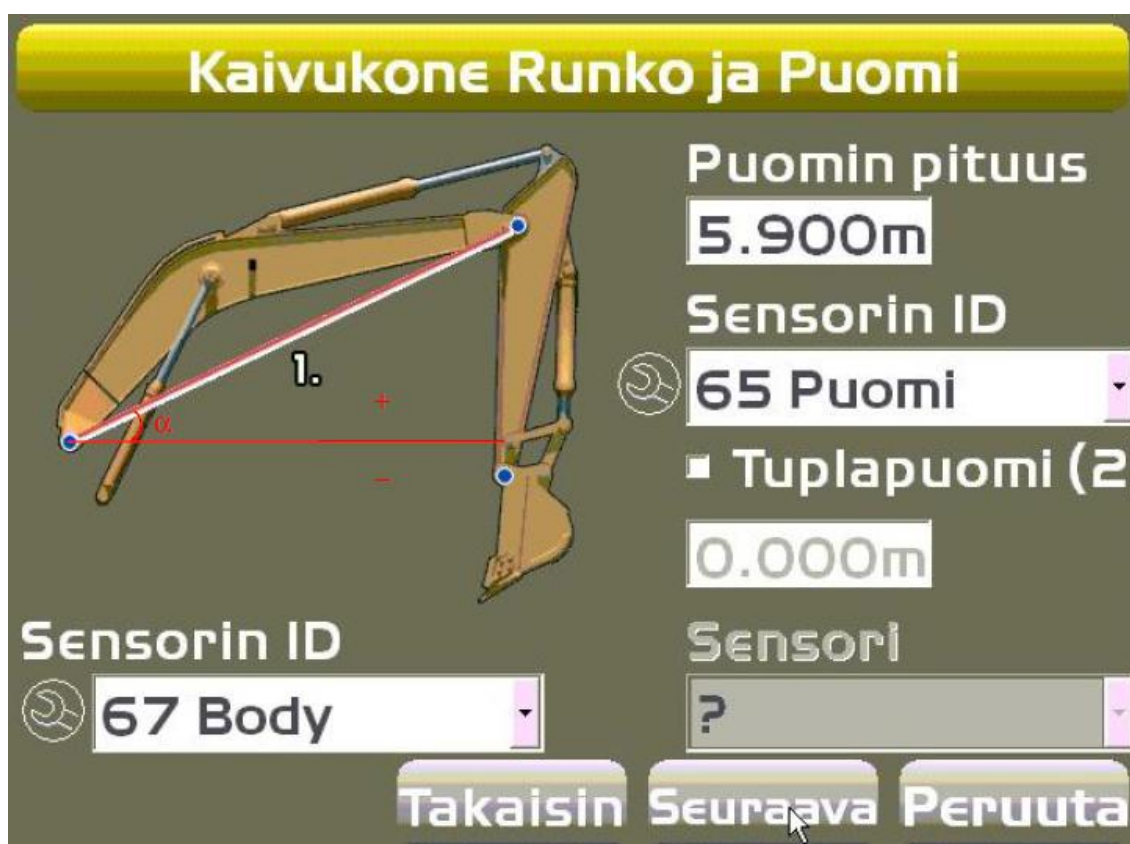
Kuva 47. GNSS-antennien korkeuden syöttäminen järjestelmään [44].

GNSS-antennien korkeus selvitetään pistetiedostosta mittaamalla rungon ja pääpuomin yhdistävän kiinnitystapin keskipisteen ja GNSS-antennien jalustojen kierretapin päältä otettujen havaintojen välinen korkeusero. Kummallekin antennille syötetään niiden omat arvonsa kuvan 47 mukaisesti. Kuvassa näkyvä mitta numero 3 ei vaikuta koneohjausjärjestelmän paikannustarkkuuteen vaan simuloi, miten kaivinkoneen oma korkeus piirtyy visuaalisesti koneohjausjärjestelmän näytöllä. Tämä mitta voidaan arvioida tai selvittää karkeasti rullamitalla. Samalla määritetään käytössä olevien GNSS-antennien mukainen tyyppi antennit-kohdan valikosta. [30]



Kuva 48. Koneen pyörimiskeskipisteen sitominen koneen muihin mittoihin [44].

Kaivinkoneen ohjausjärjestelmän toiminnan kannalta pyörimiskeskipisteen sitominen koneen puomien keskilinjaan sekä rungon ja pääpuomin välisen kiinnitystapin sijaintiin on äärimmäisen oleellinen toimenpide. Mikäli kyseistä toimenpidettä ei suoritettaisi, koneen ohjausjärjestelmän paikantaminen toimisi ainoastaan siinä asennossa, missä kaivinkone oli kalibrointia suoritettaessa. Jotta kauhan nurkkapisteille saadaan tarkat koordinaatit aina, riippumatta koneen työskentely asennosta, täytyy pyörimiskeskipiste sitoa koneen muihin mittoihin. Järjestelmälle kerrotaan kuvan 48 mukaisesti pyörimiskeskipisteen pituussuuntainen poikkeama edellä mainitusta kiinnitystapista sekä sivuttaissuuntainen poikkeama puomien keskilinjasta. [30]



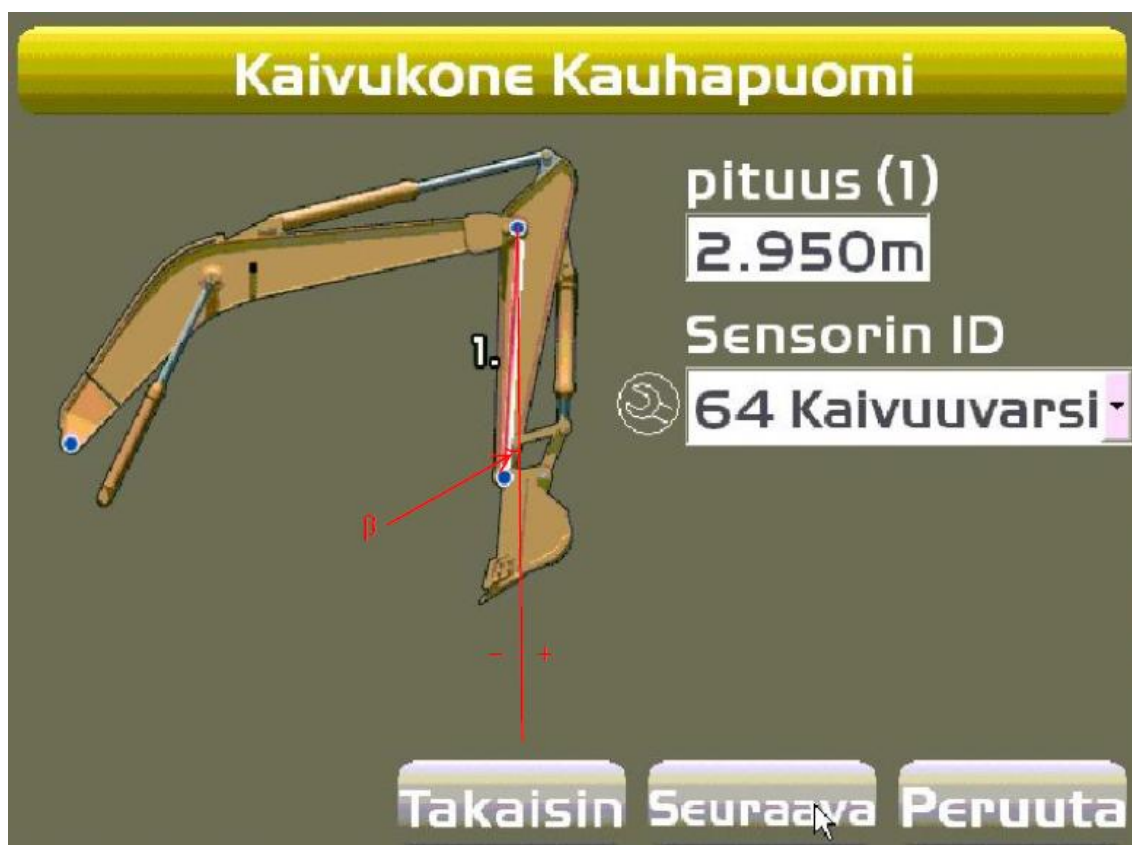
Kuva 49. Rungon ja pääpuomin antureiden sekä puomin pituuden määrittäminen [44].

Seuraavaksi vuorossa on rungon- ja pääpuomin inertianmittausantureiden, sekä pääpuomin pituuden määrittäminen. Pääpuomin pituus on helppo määrittää pistetiedostosta 3D-Winin avulla, selvittämällä ainoastaan kuvassa 49 hyvin näkyvien kiinnitystappien välinen vinoetäisyys  $l$ . Anturien määrittäminen tapahtuu syöttämällä kumpaankin sensorin ID-kenttään kyseisen fyysisen TS-1-inertianmittausanturin numero. [30]

Anturien kallistuskulman kalibroinnin pääsee suorittamaan painamalla anturin ID:n vieressä olevaa kiintoavaimen kuvaa, jonka jälkeen avautuvassa ikkunassa pääsee muuttamaan anturin kallistuskulmaa. Rungon anturin kallistuskulmat kuvaavat koneen rungon pituus- ja sivuttaissuuntaisia kallistuksia. Mikäli kone on tasaisella alustalla, esim. teollisuushallin lattialla, voidaan kumpikin arvoista muuttaa nollassa. Pääpuomin anturin kallistuskulma kuvaa anturin asennon suhdetta vaakatasoon. Pääpuomin liikkeessä vaakatason yläpuolella anturin ilmoittama kallistuskulma on positiivinen, muuttuen vaakatason alapuolella miinusmerkkiseksi. [30]

Pääpuomin kalibrointi voidaan suorittaa kahdella tapaa. Helpoin tapa toteuttaa kalibrointi on liikuttaa koneen puomi esim. takymetrin tai tasolaserin avulla sellaiseen asentoon, että kaivuvarren suunnassa oleva kiinnitystapin keskipiste asettuu samaan korkeuteen rungon pään kiinnitystapin keskipisteen kanssa. Pääpuomi asettuu tällöin vaakatasoon, ja anturin kallistuskulmaksi voidaan muuttaa tilannetta kuvaava nolla. [27; 30.]

Edellä mainittu tapa vaatii käytännössä aina montun kaivamista koneen etupuolelle, jotta pääpuomi saadaan laskettua tarpeeksi alas vaakatason muodostamiseksi. Esim. halliolosuhteissa tämä on varsin harvoin mahdollista, jolloin kalibrointi täytyy tehdä laskemalla koneen kiinnitystappilinjan ja vaakatason välinen kulma (kuva 49). Kulma voidaan selvittää esim. 3D-Winin avulla laskemalla suoraan kaivuvarren päässä olevan kiinnitystapin alapuolelle uusi piste, jolle annetaan rungon pään kiinnitystapin korko. Tämän jälkeen selvitetään muodostuvien linjojen välinen kulma. Saatua kulma syötetään koneen ohjausjärjestelmään. Tärkeää on, että kyseisessä tapauksessa kaivinkonetta ei missään tapauksessa liikuteta mittauksen ja kalibroinnin välisenä aikana. [30]



Kuva 50. Kaivuvarren pituus ja anturin määrittäminen [44].

Kaivuvarren anturin kalibroiminen noudattaa täysin samoja periaatteita kuin pääpuomin anturin kalibroiminenkin. Järjestelmälle syötetään tieto kaivuvarren pituudesta, joka voidaan selvittää pistetiedostosta laskemalla kiinnitystappien välinen vinoetäisyys. Anturin kulman kalibroiminen tapahtuu selvittämällä anturin asento suhteessa pystysuoraan, joka alkaa kaivuvarren ja pääpuomin välisen kiinnitystapin keskeltä (kuva 50). Aivan kuten pääpuominkin tapauksessa kalibrointi voidaan suorittaa kahdella eri tavalla. Jos koneen eteen maastoon on mahdollista kaivaa kuoppa, voidaan kaivuvarren kiinnitystapit asettaa samalle pystysuoralle linjalle takymetrin tai luotilangan avulla. Tämän jälkeen anturin mittaamaksi kulmaksi asetetaan nolla. [27; 30.]

Mikäli kyseistä kuoppaa ei voida kaivaa ja kaivinkonetta ei ole liikutettu mittauksen jälkeen, voidaan kyseinen pystykulma selvittää laskemalla uusi piste suoraan pääpuomin ja kaivuvarren kiinnitystapin alapuolelle, ja selvittämällä muodostuvan linjan ja kiinnitystappien muodostaman linjan välinen kulma. Saatua tulosta syötetään järjestelmään, kulman negatiivisen tai positiivisen etumerkin määräytyessä kuvan 50 mukaisesti. [30]



## Kaivukoneen kauhan asetukset

**Kauhan nimi:**



luiska engon 63

Leveys (1)

2.100m

mitta 2

1.970m

☒ Kall. kauha

mitta 3

0.400m

Sensori ID

⌂

63 Yhdistelmä

▼

Seuraava

Peruuta

Kuva 51. Kauhan mitoitus [44].

Kauhan mitoitus suoritetaan aina kauhakohtaisesti. Mikäli kaivinkone tulee käyttämään useampaa kuin yhtä kauhaa työmaalla, tulee jokaiselle kauhalle luoda oma profiilinsa ja kalibrointinsa kauhakirjastoon. Kauhasta tulee selvittää kuvassa 51 ilmenevät kolme mitta. Kuvassa näkyvät kauhan huulilevyn leveyden ilmaiseva mitta numero 1 sekä huulilevyn etureunan ja kaivuvarren kiinnitystapin keskilinjan välisen etäisyyden ilmaiseva mitta numero 2 voidaan mitata tavallisen rullamitan avulla. Kaivuvarren kiinnitystapin ja kauhan sivuttaiskallistumisen mahdollistavan tapin välinen etäisyys on helpoin laskea mitatusta pistetiedostosta. Saadut arvot ja oikea anturin numero syötetään järjestelmään. [27; 30.]





Kuva 52. Kauhan asennon kalibroiminen [44].

Kauhan asennon kalibroiminen tapahtuu kahdessa osassa. Ensimmäiseksi kalibroidaan kauhan kärki asettamalla huulilevyn kärki samalle pystysuoralle akselille kaivuvarren ja kauhan välisen kiinnitystapin keskilinjaan kanssa. Helpointa tämä on suorittaa käyttämällä magneettia ja luotilankaa. Kun kauha on asetettu samalle linjalle, painetaan näytöllä näkyvää "kalibroi" näppäintä. Tämän jälkeen kauha asetetaan tasaiselle pohjalle, minkä jälkeen suoritetaan kalibroiminen painamalla näytöllä näkyvää "kalibroi" näppäintä (kuva 52). [27; 30.]

Kyseisten toimenpiteiden jälkeen koneen asennuksen yhteydessä tehtävä kalibroiminen on suoritettu. Ennen töiden aloittamista työmaalla tulee koneen paikannustarkkuus selvittää työmaalla käytössä olevassa koordinaatistossa useassa eri koneen asennossa. Koneen tarkkuuden tulee päästä kuvassa 53 esitettyihin toleransseihin. Mikäli koneen paikannuksen korkeudessa on eroavaisuutta esim. takymetrin ilmoittamaan korkeuteen, voidaan koneen ensisijaisen GNSS-antennin korkeutta muuttaa vaadittavan arvon verran, minkä jälkeen myös korkeus asettuu oikeaksi. [20; 27; 30.]

## 7 Työmaan rakentamisen aikaiset työtehtävät

### 7.1 Tietomallikoordinaattorin toimenkuva rakentamisen aikana

Tietomallikoordinaattorin rakentamisen aikana suoritettavat työtehtävät vaihtelevat paljon rakennuskohteen koon mukaan. Työmaan koosta riippumatta tietomallikoordinaat-

tori toimii yhteyshenkilönä suunnittelijoiden, työmaajohdon sekä mittaushenkilöstön ja koneenkuljettajien välillä. Tämä tarkoittaa sitä, että tietomallikoordinaattorin yksi tärkeimmistä tehtävistä on huolehtia, että työmaalla käytetään kullakin ajanhetkellä oikeata suunnitelma-aineistoa. Isoilla työmailla suunnitelma-aineistoon saattaa tulla jopa useita muutoksia päivän aikana. Tämä asettaa ison haasteen tietomallikoordinaattorille valvoa, että kukin yksittäinen henkilö työmaalla on tietoinen muutoksista ja käyttää työssään oikeaa versiota suunnitelmasta. [6; 28.]

Tämän lisäksi aina kun suunnitelmissa mennään muuttamaan jotakin, on riskinä, että koneohjausjärjestelmille rakennetuissa malleissa tapahtuu myös muutoksia. Tietomallikoordinaattorin täytyy tällöin korjata jo valmiita malleja vastaamaan suunnittelijan toteuttamia muutoksia tarpeen vaatiessa.

Isot työmaat, esim. valtatiehankkeet, työllistävät tietomallikoordinaattorina työskentelevää henkilöä jatkuvasti. Tämän vuoksi olisikin suotavaa, että kyseenomaisia hankkeita hoitava koordinaattorilla olisi mahdollisuus toimia kyseisen työmaan palveluksessa kokopäiväisesti, jolloin uusien mallien tuottaminen ja ajantasaisista suunnitelmista huolehtiminen tapahtuisi mahdollisimman jouhevasti. Isoilla työmailla on lisäksi mahdollonta tehdä useita kilometrejä pitkiä malleja kerralla valmiiksi ennen työmaan rakentamisen aloittamista, joten tietomallikoordinaattori joutuu rakentamaan koko työmaan kattavan mallin palasista aina sitä mukaan millä alueella kulloinkin tarvitsee toimivaa koneohjausdataa. [28]

Pienemmillä työmailla ei esiinny vastaavanlaista jatkuvaa suunnitelmien muuttumista ja uusien alueiden rakentamisen aloittamista. Useasti riittääkin, että pienemmille työmaille rakennetaan työmaan alussa toimivat mallit niistä elementeistä, joista työmaanjohto ja koneen kuljettajat ne haluavat ja joita hyödynnetään muuttamattomina työmaan alusta aina lopetukseen saakka.

## 7.2 Laadunvarmistaminen

On kyse sitten koneohjauksella tai perinteisellä tavalla rakennetuista työkohteista, on laadunvarmistaminen iso osa koko työmaan toimenkuvaa. Itse sana laatu voidaan käsitellä usealla tavalla. Laatu voidaan määritellä sen mukaan, mitä työn tai palvelun ostaja olettaa saavansa työtä tilatessaan. Minkälaiset oletukset hänellä on työjälkeä, mate-

riaaleja tai itse palvelua kohtaan. Mikäli asiakas on tyytyväinen saamaansa työsuoritteeseen tai palveluun, voidaan sen sanoa olleen laadukasta. Asiakas ei ole kuitenkaan aina tyytyväinen saamaansa lopputulokseen. Tämä voi johtua työnsuorittajan välinpitämättömyydestä tai ammattitaidon puutteesta, mutta on myös mahdollista, että itse asiakas ei ole osannut tai on määritellyt väärin haluamansa lopputuloksen kriteerit. Jotta edellä mainitulta tilanteelta välttyttäisiin, on eri aloille muodostettu omat laatuohjeistuksensa, joissa määritellään yhteiset pelisäännöt. Tämän lisäksi yksityiset urakoitsijat ovat luoneet palveluillensa omat laatustandardinsa, joiden pohjalta he myyvät työnsä asiakkaille.

Maarakennuspuolella rakentamisen laatua ohjataan standardien avulla. InfraRYL sisältää infra-alan yleiset laatuvaatimukset yksiin kansiin toteutettuna. Ohjeistuksessa määritetään maarakentamista koskevat rakenteiden ja käytön aikaiset vaatimukset sekä työn lopputulosta koskevat rakennustekniset laatuvaatimukset. Ohjeistuksella mahdollistetaan yhteisten sääntöjen löytyminen tilaajan, pääurakoitsijan ja aliurakoitsijoiden välille. [26]

Tietomallipohjaiselle rakentamiselle ollaan myös luomassa omat laatustandardinsa. Luonnosvaiheessa oleva *tie- ja ratarakentamisen mallipohjainen laadunvalvontamenetelmä*, joka on osa InfraFINBIM-kokonaisuutta, luo vaihtoehtoisen ohjeistuksen laadunvalvontamenettelylle sellaisille työmaille, jotka suoritetaan alusta loppuun asti tietomallipohjaisesti sekä koneohjausta hyväksi käyttäen. [20]

Mallipohjainen laadunvarmistusmenetelmä on osa urakoitsijan laaturaportointia ja sillä on tarkoitus tuottaa tietoa työn aikaisen esi- ja pikaraportoinnin sekä työmaan dokumentoinnin tarpeisiin. Ohjeistuksella *tie- ja ratarakentamisen mallipohjainen laadunvalvontamenetelmä* pyritään ohjaamaan urakoitsijaa ymmärtämään mallipohjaisen laadunvalvontamenettelyn käyttöönoton edellytykset, päävaiheet sekä rakennettavasta kohteesta dokumentoitava aineisto.

| Rakenneosa  | Suurin sallittu yks. sijainnin poikkeama (InfraRYL) | Suurin sallittu yks. korkeuden poikkeama (InfraRYL) | Työkoneautomaatiojärjestelmältä vaadittava tarkkuus XY;Z |
|---|---|---|--|
|   | mm  | mm  | mm   |
| Maaleikkaus (201100), maatai louhepengeri(18100), tie ja rata | - 0 / +200  | + 0 / -100  | + - 100; + -30   |
| Suodatinkerros, tie/rata (211100)                             | - 0 / +150  | + - 40  | + - 100; + -30   |
| Jakavakerros, tie (212100)                                    | - 0 / +150  | + - 30  | + - 100; + -30   |
| Kantavakerros, tie (213100)                                   | - 0 / +150  | + - 20  | + - 50; + -30  |
| Eristyskerros yläpinta, rata (212200)                         | - 0 / +100  | +0 / -50  | + - 50; + -30  |
| Välikerros yläpinta, rata (212300)                            | - 0 / +50   | +0 / -20  | + - 50; + -30  |

Kuva 53. InfraRYL:in tarkkuusvaatimukset ja esitetty koneohjauksen tarkkuus kyseisiä rakenteita työstettäessä [20, s. 4].

Vaatimuksena mallipohjaisen laadunvarmistusmenetelmän käyttöönotolle on, että suunnittelussa luotu toteutusmalli on luotu InfraBIM-mallinnusohjeiden osan 4 *Väylämallin toteutusmallin laatimisohe* mukaan. Työkoneautomaatiota tulee käyttää kaikissa niissä työkoneissa, jotka toteuttavat työkohteen rakenneosien geometriaa. Lisäksi työkoneautomaatiolla toteutetun työjäljen tulee täyttää kuvassa 53 esitetyt InfraRYL-vaatimukset. [20]

Mallipohjainen laadunvarmistusmenetelmä voidaan jakaa neljään päävaiheeseen; toteutusmallin oikeellisuuden varmistamiseen ja dokumentointiin, työkonejärjestelmän ja GNSS-tukiaseman tarkkuuden seurantaan ja dokumentointiin, työkonejärjestelmällä tehtävään toteutumamittaukseen sekä muuhun työn aikaiseen valvontaan ja tarkemittaukseen 200 metrin välein sekä rakenteiden muutoskohdista. [20]

### 7.2.1 Toteutusmallin oikeellisuuden varmistamiseen

Toteutusmallin oikeellisuuden varmistamisen ja dokumentoinnin tarkoituksena on varmistaa, että työmaan suunnittelulähtökohta on kunnossa, joka tapahtuu selvittämällä toteutusmallin laatu ja hyödynnettävyys rakennettavassa kohteessa. Tarkastettu toteutusmalli voidaan tämän jälkeen siirtää suoraan palvelimelle, josta se on koneohjausjärjestelmien ja mittaushenkilöstön helposti saavutettavissa. Itse suoritettava tarkastus tulee dokumentoida joko mittauspäällikön tai tietomallikoordinaattorin toimesta. [20; 35.]

Toteutusmallin tarkastuksen tulee kattaa seuraavat asiat ennen sen käyttöönottoa itse toteuttavassa tuotannossa:

- Tutustuminen toteutusmalliselostukseen sekä mainittuihin poikkeamiin.
- Lähdeaineiston täydennyspyynnön tekeminen suunnittelijalle tarpeen vaatiessa.
- Työmaan ja toteutusmallien koordinaatti- ja korkeusjärjestelmien yhtenäisyyden toteaminen.
- Rakenneosien mallien ja taiteviivojen aukottomuuden ja jatkuvuuden tarkastaminen. Mikäli aukot ovat kooltaan vähäisiä, eivätkä tarvitse uutta lähtötietoa suunnittelijalta, voidaan ne korjata suoraan työmaalla.
- Ylimääräisten viivojen, pisteiden sekä objektien poistaminen aineistosta.
- Toteutusmallin mukaan tapahtuvan rakentamisen työturvallisuuden toteaminen, tapahtuu työnjohdon toimesta.
- Toteutusmallin muuttaminen koneohjausjärjestelmien tiedostomuotoihin.

Suoritettava tarkastus dokumentoidaan kirjaamalla ylös kaikki löydetty suunnitteluvirheet ja toteutusmalliin tehdyt oleelliset muutokset. Kun toteutusmalli on tarkastettu yllä olevien ohjeiden mukaisesti ja tarkastus on dokumentoitu, voidaan malli siirtää suoritettavan portaan hyödynnettäväksi. [20; 35.]

### 7.2.2 Työkoneautomaatiojärjestelmän ja GNSS-tukiaseman tarkkuuden seuranta ja dokumentointi

Kun rakentaminen suoritetaan koneohjausjärjestelmillä eikä perinteistä maastoon merkintää suoriteta mittaushenkilöstön toimesta, herää kysymys siitä, kuinka voidaan olla varmoja, että työkoneiden työjälki vastaa todellisuudessa mittaustarkkuudeltaan suunnitelmaa. Kun työkone saapuu työmaalle, tulee sen paikannustarkkuus aina selvittää työmaalla toimivassa koordinaatti- ja korkeusjärjestelmässä. Tarkastaminen tapahtuu useimmiten takymetrillä mittaamalla. Takymetrin oma mittaustarkkuus perustuu sen käyttämien lähtöpisteiden sijaintitarkkuuteen. Jos takymetrin asemointi tehdään GNSS:llä mitatuista pisteistä, perustuu myös takymetrillä tapahtuva paikannustarkkuus koordinaatistossa GNSS-mitatuksen tarkkuuteen. Kiinteät kiintopisteet voivat puolestaan liikkua fyysisesti, jolloin kojeen asemoinnissakin tapahtuu väkisin virhettä. Tämän vuoksi tarkistusmittausta tekevän henkilön on syytä tarkastella työmaakohtaisesti, mikä menetelmä soveltuu parhaiten kyseisessä kohteessa työkoneen paikannustarkkuuden selvittämiseen. Itse työkoneesta tarkastetaan kauhan, tai terän, koordinaattipisteet useammassa eri koneen työasennossa, ja jos työkoneen järjestelmän ilmoittamat erot mitat suhteessa mittalaitteella mitattuihin koordinaatteihin pysyvät samoina koko ajan täyttäen samalla kuvassa 53 ilmoitetut työkoneautomaation toleranssit, voidaan todeta työkoneen tekemän työjäljen täyttävän sille asetetut vaatimukset. [20; 34.]

Hyvien mittaustapojen mukaista on, että mittalaitteiden toimintaa seurataan ja niillä suoritetaan tarkistusmittauksia määrätyin väliajoin, jolloin voidaan varmistua siitä, että mittalaite täyttää sille asetetut vaatimukset tarkkuudesta. Koneohjausjärjestelmällä varustettu työkone on itsessään myös mittalaite, jonka tarkkuutta tulee seurata. Johtuen siitä, että koneohjausjärjestelmät ovat kovan fyysisen rasituksen ja värinän alaisia, tulee järjestelmien tarkkuus suorittaa työn luonteen- ja tarkkuusvaatimusten edellyttämällä tiheydellä vertaamalla järjestelmän osoittamia koordinaatteja takymetrimittauksella saatuihin koordinaatteihin. Vaihtoehtoisesti tarkastusmittaus voidaan suorittaa tunnetulla tarkastuspisteellä, mikäli sellainen pystytään rakentamaan työmaalle kiinteään rakenteeseen, esimerkiksi avokallioon. Tulokset tulee dokumentoida, jotta saadut tarkastustulokset olisivat myös myöhemmin tarpeen vaatiessa todettavissa. Dokumenttiraportin tulee olla konekohtainen, ja siitä tulee ilmetä koneen ilmoittamien koordinaattien poikkeamat suhteessa takymetrin tuloksiin jokaisen koordinaattiakselin suhteen, tarkastuksen päivämäärä sekä paikka sekä tarkastuksen tekijä. Hyvä esimerkki koneohjausjärjestelmän tarkastusraportista on liitteessä 2 oleva Tallqvist Infra Oy:n tarkastusraportti. Huolella suoritettu koneohjauksen tarkkuuden seuranta dokumentteineen on iso osa

työkohteen laadun todentamista. Mikäli työkone ei täytä sille kuvassa 53 säädettyjä toleranssiarvoja, täytyy työkoneella selvittää, mistä virhelähde on järjestelmään päässyt syntymään. Kun virhelähde on paikallistettu ja työkoneen paikannustarkkuus täyttää jälleen sille asetetut raja-arvot, voi palata toteuttavaan työhönsä. [20; 34; 35.]

Kun paikannusmenetelmänä käytetään RTK-menetelmää, kaikki mittaaminen perustuu siihen olettamukseen, että tunnetulla pisteellä sijaitseva referenssiasema on stabiili. Mikäli tukiasema pääsee liikkumaan fyysisesti, välittyy mittauspäähän väärää korjaussignaalia ja mittaukset tapahtuvat virheellisesti. Tämän vuoksi onkin tärkeää, että myös GNSS-tukiasema tarkastetaan koneohjausjärjestelmien tapaan säännöllisesti. Tukiaseman tarkkuuden seuraaminen tapahtuu työn luonteen ja tarkkuusvaatimusten edellyttämällä tiheydellä GNSS-mittalaitteella. Saadut koordinaattiarvot dokumentoidaan. Tämän lisäksi tulee suorittaa kerran kuukaudessa tukiaseman sijainnin tarkastaminen takymetrillä, jolloin voidaan lopullisesti varmistua siitä, että tukiasema pysyy paikallaan. Tämän lisäksi tukiaseman sijainnin tarkistusmittaus tulee suorittaa aina, kun on syytä epäillä, että tukiasema on saattanut liikkua esimerkiksi työkoneen törmäyksen seurauksena. [20; 34.]

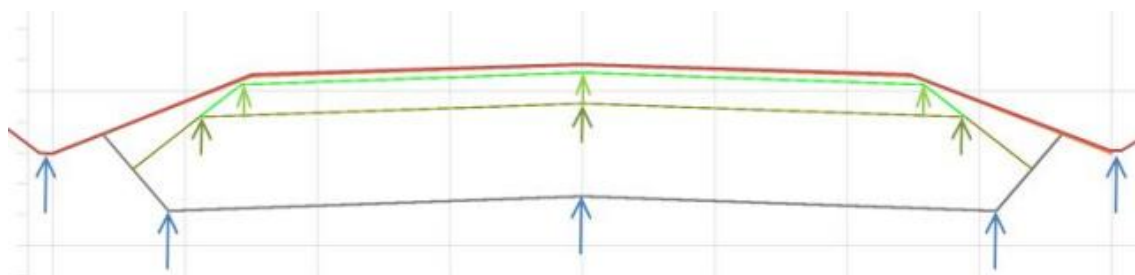
### 7.2.3 Työkoneautomaatiojärjestelmällä tehtävä toteumamittaus ja muu työn aikainen laadunvalvonta

Maarakennuspuolella työjälkeä valvotaan tarke- eli toteumamittausten avulla. Mittauksilla selvitetään, miten kunkin rakenteen rakentaminen on onnistunut vertaamalla toteutuneita rakenteiden pintoja suhteessa suunnitelmien mukaisiin tasoihin. Rakentamisessa ei kuitenkaan tulla koskaan pääsemään suunnitelmien mukaisiin pintoihin ja arvoihin jokaisessa rakennettavassa elementissä. Tämän vuoksi eri työsuoritteille on määritetty toleranssit, jotka ilmaisevat minkälaisten arvojen sisään kunkin työsuoritteen toteutetun jäljen on asetuttava. Mikäli työjäljessä esiintyy toleranssiarvoja suurempia poikkeamia, on työjälki korjattava tai tehtävä poikkeamaraportti, jossa selvitetään, missä kohdin ja minkä vuoksi on rakennettu suunnitelmasta ja toleransseista poikkeavasti. [20]

Perinteisesti maarakennustyömailla työkoneiden työjäljen laadusta on huolehtinut mittaushenkilöstö. Laadun varmistaminen on alkanut työmaan käyttökiintopisteiden luomisesta, jossa mittaushenkilöstö on kunkin ajan standardien mukaisesti tuonut työmaalle omat lähtöpisteensä. Tämän toimenpiteen voidaan sanoa olevan kriittisin työvaihe koko työmaalla, sillä toteutetun lähtöpisteverkon pohjalta kaikki tuleva rakentaminen tullaan

mittamaan. Työkoneiden tuottaman pinnan laadunvalvominen on alkanut mittaushenkilöstön toimesta maastoon merkinnän yhteydessä, jolloin mittaajat ovat omalla työllään varmistaneet, että suunnitelma on siirretty maastoon oikein. Kun työkoneet ovat toteuttaneet oman työsuoritteensa, on mittaushenkilöstö astunut jälleen toimenkuvaan ja mitannut toteutuneen pinnan merkiten samalla toleranssien ulkopuoliset kohdat korjausta varten. Kun koko työsuoritus on saatu toleranssien sisään, on mittaushenkilöstö tarkemittannut toteutuneen pinnan ennen sen peittämistä. Tarkemittausten tulosten pohjalta on luotu paalulukukohtaiset raportit, joissa on esitetty kunkin kohdan toteuman poikkeamat suhteessa suunnitelmaan. [20]

Koneohjausjärjestelmiä käytettäessä poistuu edellä kuvatusta prosessista maastoon merkinnän yhteydessä tapahtuva mittaushenkilöstön suorittama laatukontrolli, joka voidaan korvata edellisessä luvussa mainitulla koneohjausjärjestelmien tarkkuuden säännöllisellä kontrolloinnilla. Tämän jälkeen koneohjauksella varustetun työkoneen voidaan katsoa olevan kykenevä mittalaite, joka voi suorittaa itsenäisesti oman työjälkensä toteumamittauksia. Työkoneen tekemät toteumamittaukset tulee tehdä rakenneosa kohtaisesti enintään 20 metrin välein poikkileikkauksittain mittaamalla havainnot merkitsevien taiteviivojen kohdalta (kuva 54). [20]



Kuva 54. Toteumamittauksessa suoritettavan tiedonkeruun ohjeelliset mittauskohdat [20, s. 8].

Toteumamittaus koneohjausjärjestelmällä varustetulla työkoneella toteutetaan seuraavien vaatimusten mukaisesti [20]:

- Työkoneen paikannustarkkuus tulee todeta riittäväksi kuvassa 39 esitettyihin vaatimuksiin kunkin rakennettavan rakenteen suhteen.
- Työkoneen kuljettaja tulee perehdyttää toteumamittausten tekemiseen luvussa 4.4 ohjeistetulla tavalla.
- Toteumamittaus voidaan suorittaa työkoneella kuvassa 48 mainituista rakenteista. Tämän lisäksi työkoneella voidaan kerätä toteumatieto raken-



teeseen tulevien paine- ja kaapelisuoja-putkien, valopylväiden anturoiden sekä kaapeleiden osalta.

- Kaivojen, viettoputkistojen, kaapelisuoja-patteristojen sekä vastaavien varusteiden, sekä kantavan- ja valmiin pinnan toteumamittauksen tekemiseen työkonemittausta ei käytetä, ellei järjestelmän toimivuutta ja paikannustarkkuutta todenneta erikseen laatuvaatimukset täyttäväksi.
- Toteumamittaukset tulee tehdä väylän suuntaisesti enintään 20 metrin välein kulkusuuntaan katsottuna kuvan 49 osoittamista rakenteiden kohdista.

Koneohjausjärjestelmä voidaan todeta kaivojen, kaapelinsuoja-patteristojen, kantavan- ja jakavan kerroksen pintojen sekä vastaavien tiukempien toleranssien rakenteista toteamalla koneen paikannustarkkuus laatuvaatimukset täyttäväksi. Käytännössä tämä tapahtuu siten, että koneen paikannustarkkuus tarkistetaan vähintään kerran viikossa, jolloin tarkkuuden tulee täyttää kartoitettavien pintojen toleranssiarvot. Tämän jälkeen koneen kuljettaja suorittaa itsenäisesti koneensa paikannustarkkuuden monitorointia päivittäin. Mikäli paikannustarkkuus putoaa toleransseista, ei konetta voida käyttää toteumamittauksen keräämiseen ennen kuin paikannuksessa tapahtuva virhelähde on paikannettu ja poistettu järjestelmästä, jonka jälkeen koneen paikannustarkkuus tulee vielä todeta aiemmin mainituin keinoin. [31]

Viimekädessä toteumamittausten suorittamisesta työmaalla vastaa aina mittauspäällikkö tai työkoneautomaation vastuuhenkilö, tietomallikoordinaattori. Toteumamittausten tekemisessä korostuukin yhteistyö edellä mainittujen henkilöiden sekä koneen kuljettajien välillä. Tämän vuoksi koneen kuljettajien kouluttamiseen tulee käyttää riittävästi aikaa, sillä mikäli toteumamittaukset jäävät tekemättä, on niiden suorittaminen jälkikäteen sekä erittäin työlästä että kallista. [20]

#### 7.2.4 Mittaushenkilöstön suorittama tarkemittaus

Mittaushenkilöstön suorittamalla tarkemittauksella varmistutaan viimekädessä rakennettujen pintojen toteutumisesta laatuvaatimusten mukaisesti. Perinteisesti mittaushenkilöstö on suorittanut tarkemittauksen rakennekohtaisesti poikkileikkausmenetelmällä 20 metrin välein, mutta työkoneautomaatiolla varustetuilla työmailla kykenevät työkonet suorittamaan tämän toimenpiteen jatkossa itsenäisesti.

Jatkossa mittaushenkilöstö tulee suorittamaan tarkemittauksensa lähtökohtaisesti suorilla ja loivasti kaareutuvilla väylän osilla 200 metrin välein. Mikäli väylän kaaren säde on yli 1 500-, mutta alle 3 000 metriä, tulee mittaushenkilöstön suorittaa tarkemittaus 100 metrin välein. Mikäli väylän kaarresäde on alle 1 500 metriä, tulee tarkemittaukset tehdä 50 metrin välein (taulukko 2). Mikäli rakennekerrosten paksuudessa tai tyypissä tapahtuu muutoksia, tulee mittaushenkilöstön ottaa tarkkeet myös kyseisiltä rakenteiden kohdilta. [20; 35.]

Mikäli mittaushenkilöstön suorittamassa tarkemittauksessa havaitaan, että rakenne ei täytä sille asetettuja tarkkuusvaatimuksia, tiennetään mittaussväliksi 50 metriä, minkä jälkeen selvitetään tarvittavan usealla mittauksella rakenteen poikkeamien sijainnit, jotka korjataan tämän jälkeen välittömästi. Kun korjatun kohteen alueelta neljästä kohdasta otetuista tarkemittauksista ei havaita enää liian suuria poikkeamia, voidaan palata takaisin vaakageometrian määrittämään mittaussväliin. Mikäli poikkeamakohteita ei pystytä korjaamaan suunnitelmien mukaisesti, tulee toimittaa poikkeamaraportti, joka sisältää tiedot tapahtuneesta poikkeamasta ja sen arvioidut vaikutukset rakenteeseen. [20]

Taulukko 2. Väylän vaakageometrian vaikutus tarkemittausväliin [20].

| Väylän vaakageometria | Mittaussväli [m] |
|-----------------------|------------------|
| Suora                 | 200              |
| Kaarresäde > 3000     | 200              |
| Kaarresäde > 1500     | 100              |
| Kaarresäde < 1500     | 50               |

Mikäli jotain työkohteen rakennetta ei pystytä toteuttamaan kokonaan työkoneautomaatiolla toteutusmallin mukaan, esimerkiksi johtuen koneohjauskoneen rikkoutumisesta, tulee mittaushenkilöstön tehdä rakenteesta tarkemittaukset siten kuin InfraRYL:ssä on säädetty. [20]

Toteuma- ja tarkemittausten tuloksen dokumentoidaan aina. Tulokset tulee esittää numeerisina poikkeamatietoina, joissa esitetään teoreettisen rakennepinnan ja toteutettujen mittaustulosten erot [20]. Tarkemmin tarkemittausten toteumaraporttien luomisesta kerrotaan luvussa 8.1.

### 7.2.5 Dokumentointi

Laadunvalvonnan tarkoituksena on tuottaa työtilaajalle ja työnjohdolle luotettavia raportteja, joiden avulla pystytään toteamaan, kuinka kohteen rakentaminen on onnistunut. Urakoitsijan tulee huolehtia luvuissa 7.2.1–7.2.4 mainittujen työtehtävien dokumentoinnista sekä säilyttää kaikki mallipohjaisen laadunvalvonnan raportit sekä aineistot. Kaikki dokumentoidut aineistot tulee luovuttaa työtilaajalle ja valvontaorganisaatiolle sovittuina ajanhetkinä tai viimeistään rakennettavan kohteen lopputarkastuksen yhteydessä. [20]

## 8 Työmaan rakentamisen lopettamisen aikaiset työtehtävät

### Työmaan luovutus

Kun työmaa valmistuu, koittaa sen luovutuksen aika. Luovutuksessa työn tilaaja ja valvoja tarkastavat, vastaako toteutunut rakentaminen laadultaan sille asetettuja normeja. Mikäli tarkastuksessa ilmenee huomautettavaa, joutuu urakoitsija korjaamaan todetut puutteet halutulla tavalla. Mittaushenkilöstön tuottamat toteumamittaukset tuloksineen on tärkeässä osassa työmaanluovutuksen aikana, sillä niistä selviää suoraan kuinka hyvin rakentaminen on vastannut suunnittelua. Yleisesti luovutuksen alla mittaushenkilöstön keskuudessa vallitsee usein hyvin kiireellinen aika, jotta tarvittavat vertailutulokset ym. raportit saadaan laskettua ja luotua.

Niin koneohjatulla kuin perinteisesti rakennetulla maarakennustyömaalla tarkkeiden tekeminen alkaa keräämällä mittaustieto tarkasteltavasta kohteesta. Työkoneista kerätään tallennettu toteumatieto fyysisesti muistitikulla tai etäyhteyden avulla. Tämän jälkeen pistetiedosto avataan käsittelyyn sopivalla ohjelmalla, esimerkiksi 3D-Winillä.

Pistetiedostosta poimitaan kunkin eri kerroksen pisteet omaksi tiedostokseen. Tämä toimenpide on helppo toteuttaa esimerkiksi poimimalla samalla koodilla varustetut pisteet omalle tasolleen. Tämä toimenpide onnistuu silloin jos työkoneen kuljettaja on ymmärtänyt toteumamittauksia tehdessään koodata kunkin toteuttamansa pinnan pisteet yksiselitteisesti omaan tasoonsa. Valitettavasti usein kaikki koneen mittaamat toteumapisteet on kuitenkin kartoitettu samaan pistetiedostoon. Tämä tarkoittaa sitä, että tarkkeita tehdessä tiedosta käsittelevän henkilön on piste pisteeltä käytävä pisteet läpi

ja selvitettävä, mihin kerrokseen ko. toteumamittauksen tulos kuuluu. Tähän toimenpiteeseen kuluu huomattavasti turhaa aikaa, jonka takia koneen kuljettajien koulutuksessa tapahtuvaa toteumamittausten tekemistä koskevaa osiota kannattaa panostaa kunnolla. [31; 33.]

Kun kunkin eri kerroksen toteumapisteet ovat kerätty omalle tasolleen, voidaan vertailu suunnitelmaan tehdä helposti vertaamalla pisteiden sijaintia ja korkeutta suoraan koneohjausmalliin nähden. Korkeuden erotus saadaan helposti *korkeus mallista*-työkalun avulla, tasopoikkeamat puolestaan voidaan selvittää esimerkiksi suorakulmaisen laskennan avulla. [33]

Saavutetuista taso- ja korkeuseroista luodaan esimerkiksi Microsoft Excel-ohjelmaan taulukko, josta selviävät toteutuneen kerroksen eromitat esimerkiksi kahdenkymmenen paaluluvun välein. Taulukossa voidaan lisäksi ilmoittaa kyseisen kerroksen toleranssiarvot sekä korostaa ylittyneen raja-arvot. [33]

Kerrosten lisäksi toteumamittaustulosten vertailu tehdään kaikista niistä pinnoista ja rakenteista, joista työntilaaaja edellyttää vertaustulosten saamista. Lisäksi koneohjauksella varustettujen työkoneiden sekä tukiasemien paikannustarkkuuden monitoroinnin tulokset tulee jakaa työn tilaajalle. Kaikki saadut vertailutiedot, mittaustulokset sekä muut vastaavat tiedot tulee dokumentoida ja arkistoida johdonmukaisesti.

## 9 Pohdinta

### 9.1 Työn tarkoitus ja havainnot

Tämä insinöörityö on tehty suomalaiselle maanmittausalan konsulttiyritykselle Mitta Oy, ja sen tarkoituksena on ollut selvittää tietomallikoordinaattorina toimivan henkilön toimenkuvaa koneohjauksella toteutetuilla maarakennustyömailla. Tärkeimpinä lähteinä työtä tehdessä on käytetty koneohjaukseen ja mallintamiseen perustuvia jo olemassa olevia insinööritöitä sekä alan asiantuntijoiden haastatteluita.

Tämän insinöörityön tekeminen koettiin tarpeelliseksi, sillä työkoneautomaation voidaan kiistatta katsoa tulleen osaksi tulevaisuuden rakennuskulttuuria Suomessa ja maailmalla. Työn tarkoituksena on antaa lukijalleen mahdollisimman hyvä yleiskäsitys tietomallikoordinaattorin tehtävistä, sekä tukea omalta osaltaan koneohjausjärjestelmien käytön oppimista aina paikantamisen mittaustekniikasta toimivien mallien luomiseen sekä työmaan laatukontrollin toteuttamiseen. Työtä voidaan käyttää osaltaan hyväksi myös tukemaan maarakennustyömaalla oleellisten henkilöiden, kuten työnjohton ja maastomittausryhmän sekä koneen kuljettajien ymmärrystä koneohjausta ja sen vaatimuksia kohden.

Maanmittauksessa on koettu tietotekniikan kehittymisen myötä monia muutoksia niin toimintatavoissa, kuin käytettävässä välineistössäkin viimeisten 20 vuoden aikana. Teknisen kehityksen voidaan katsoa jatkuvan myös tulevaisuudessa voimakkaana ja täten ennalta arvaamattomana, minkä vuoksi tässä työssä ei voida ottaa kantaa koneohjauksen ja tietomallikoordinaattorin toimenkuvan mahdollisista kehityssuuntauksista tulevaisuudessa.

### 9.2 Työn tekijän arvio koneohjauksen sisällyttämisestä tulevaisuuden opetussuunnitelmaan.

Tietomallikoordinaattorin työtehtävä vaatii monenlaista erityisosaamista. Tämän voidaan katsoa olevan erittäin haasteellista, sillä kyseiseen työtehtävään ei ole olemassa suoraa yhteyttä missään olemassa olevassa koulutusohjelmassa. Työtä laatiessa työn tekijälle on muodostunut kuva, että helpoiten kyseiseen työtehtävään voidaan kouluttaa

henkilö, joka ymmärtää mittaustekniikan ja kolmiulotteisen ajattelutavan perusteet mahdollisimman hyvin.

Työn laatijan opiskeluaikana maanmittauksen koulutusohjelma on ollut jaettuna perus- ja ammattiopintojen lisäksi neljään eri moduuliin, jotka ovat painottuneet kiinteistö-, paikkatieto- ja mittaustekniikan sekä ympäristösuunnittelun osa-alueisiin. Edellä mainituista suuntautumisvaihtoehtoista on opiskelijan insinööriksi valmistuakseen täytynyt suorittaa kokonaisuudessaan vähintään kaksi. Tietomallikoordinaattorin tehtäviä ajattelun eniten hyötyä olisi mittaustekniikan ja paikkatiedon moduulien suorittamisesta. Vaikka henkilö suorittaisikin kaksi edellä mainittua suuntautumisen vaihtoehtoa, jää häneltä puuttumaan todella paljon tarpeellista tietoa, jotta hän kykenisi suoriutumaan välittömästi ilman lisäkoulutusta rakennustekniikan parissa tapahtuvasta mittaamisesta ilman kyseisen sektorin aiempaa työkokemusta.

Kuten jo itse työssä todettiin, koneohjaus yleistyy huomattavaa vauhtia kotimaisen maarakentamisen piirissä. Tämä tarkoittaa sitä, että etenkin pienemmillä työmailla tavallinen mittaushenkilöstö joutuu olemaan yhä enemmän ja enemmän tekemisissä koneohjauksella varustettujen työkoneiden kanssa. Koneohjauksen paikantamistarkkuuden selvittäminen ja toteumamittausten tekeminen yhdessä työkoneen kanssa ovat yleisimpiä työtehtäviä, jotka lankeavat työmaalla toimivan mittamiehen tehtäviksi. Koska tietomallikoordinaattori, tai koneohjausoperaattori, saattaa olla jopa satojen kilometrien päässä fyysiseltä työmaalta, saattaa työmaalla toimiva mittaushenkilöstö suorittaa puhelimen välityksellä tapahtuvan neuvonnan pohjalta esimerkiksi koneen uudelleen kalibroinnin, tai vastaavia työtehtäviä ongelmatilanteissa. Tämän kaltaisissa tilanteissa koneohjauksen perusteiden osaamisesta on suurta apua.

Mielestäni maanmittaustekniikan koulutusohjelman mittaustekniikan moduuliin tulisi sisällyttää koneohjaukselle oma osionsa. Kurssi voisi pitää sisällään samoja asioita kuin tämä insinöörityökin on esitellyt, aina koneohjausjärjestelmän paikantamisesta suunnitelmakuvien tulkintaan sekä koneohjausmallien rakentamiseen. Kurssi palvelisi samalla myös muille mittaussektorille hakeutuvien maanmittaajien ammattiosaamista.

## Lähteet

### Kirjalliset lähteet

- 1 Maarakentaminen. 2014. Verkkodokumentti. Wikipedia.  
<<http://fi.wikipedia.org/wiki/Maarakennus>> Luettu 31.8.2014
- 2 Pelkonen, Jari. 2012. Koneohjausjärjestelmän käyttö ja hyödyntäminen maanrakennusyrityksessä. Insinöörityo, Metropolia Ammattikorkeakoulu. <[https://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/40073/Final\\_ver.pdf?sequence=1](https://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/40073/Final_ver.pdf?sequence=1)>
- 3 Jalonen, Sami. 2009. Kaivukoneautomaatio ja sen soveltuvuus pienelle maarakennusliikkeelle. Insinöörityo. Turun Ammattikorkeakoulu.  
<[https://www.theseus.fi/xmlui/bitstream/handle/10024/33056/Sami\\_Jalonen.pdf?sequence=1](https://www.theseus.fi/xmlui/bitstream/handle/10024/33056/Sami_Jalonen.pdf?sequence=1)>
- 4 Kråknäs, Pasi. 2013. Satelliittimittaukset, opintojakso, luentokalvot. Metropolia Ammattikorkeakoulu
- 5 Mäki-Tulokas, Jouni. 2014. Satelliittimittaukset, opintojakso, esityksen kalvot. Metropolia Ammattikorkeakoulu
- 6 Harju, Janne, Tuomaala, Janne. 2011. 3D koneohjauksen mallinnusprosessi. Insinöörityo, Rovaniemen Ammattikorkeakoulu.
- 7 Nieminen, Juha-Matti. 2011. Koneohjaus maanrakennustyössä. Insinöörityo, Saimaan Ammattikorkeakoulu.  
<[http://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/27378/Nieminen\\_Juha-Matti.pdf?sequence=1](http://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/27378/Nieminen_Juha-Matti.pdf?sequence=1)>
- 8 Kråknäs, Pasi. 2013. Tietomallinnuksen konkretisointi VR Track Oy:ssä. Powerpoint esitys. <<http://www.infrajohtaminen.fi/File/377/vr-track.pdf>> Luettu 1.9.2014
- 9 Tietomallinnus. 2014. Verkkodokumentti. Suomen rakennusinsinöörien liitto RIL.  
<<http://www.ril.fi/fi/alan-kehittaminen/tietomallinnus.html>> Luettu 1.9.2014
- 10 Mäkelä, Harri. 2010. Infra TM hanke ja InfraBIM kehitystyö. Powerpoint esitys. <<http://www.ril.fi/media/files/makela.pdf>> Luettu 1.9.2014
- 11 Poutanen, Markku. 2007. Satelliittipaikannus. Geodeettinen laitos.
- 12 Laurila, Pasi. 2012. Mittaus- ja kartoitustekniikan perusteet. Rovaniemen Ammattikorkeakoulu.

- 13 Gps mittaus. 2012. Verkkodokumentti. Maanmittauslaitos.  
<<http://www.maanmittauslaitos.fi/kartat/kartoitus/gps-mittaus>> Luettu 22.9.2014
- 14 JHS 184 Kiintopistemittaus EUREF-FIN koordinaattijärjestelmässä. 5.12.2012. Standardi, versio 1.0. Verkkodokumentti. <<http://docs.jhs-suositukset.fi/jhs-suositukset/JHS184/JHS184.pdf>> Luettu 29.8.2014
- 15 Valtakunnallinen VRS-verkko. 2014. Geotrim Oy. Satelliittimittaukset, opintojakso, esityksen kalvot. Metropolia Ammattikorkeakoulu
- 16 Smartnet palvelu. 2014.. Verkkodokumentti. Leica geosystems.  
<[http://www.leica-geosystems.fi/images/new/common/fi\\_SmartNet\\_Bro.pdf](http://www.leica-geosystems.fi/images/new/common/fi_SmartNet_Bro.pdf)> Luettu 22.9.2014
- 17 Koskelo, Ilari. 2014. Navdata Oy. Satelliittimittaukset, opintojakso, esityksen kalvot. Metropolia Ammattikorkeakoulu
- 18 Mitä koneohjaus on? 2013. Verkkodokumentti. Topgeo Oy.  
<[http://www.topgeo.fi/index.php?option=com\\_content&view=article&id=121&Itemid=126](http://www.topgeo.fi/index.php?option=com_content&view=article&id=121&Itemid=126)> Luettu 28.10.2014
- 19 Väylärakenteen toteutusmallin laatimisohe, ohje pilotointia varten. 2012. Destia Oy, VR Track Oy. Verkkodokumentti. Rakennustieto.  
<[http://www.rts.fi/infrabim/infrabim\\_uusi/mallinnusohjeita/Vaylarakenteen\\_toteutusmallin\\_laatimisohe\\_17102012.pdf](http://www.rts.fi/infrabim/infrabim_uusi/mallinnusohjeita/Vaylarakenteen_toteutusmallin_laatimisohe_17102012.pdf)> Luettu 29.9.2014
- 20 Jaakkola, Mika. Tie- ja ratarakentamisen mallipohjainen laadunvalvontamenetelmä. 7.2.2014. InfraFINBIM.  
<[http://www.rts.fi/infratm/mallinnusohjeita2014/InfraBIM\\_Mallinnusohjeet\\_Osa\\_11.2\\_Mallipohjainen\\_laadunvalvontaohje\\_18032014.pdf](http://www.rts.fi/infratm/mallinnusohjeita2014/InfraBIM_Mallinnusohjeet_Osa_11.2_Mallipohjainen_laadunvalvontaohje_18032014.pdf)> Luettu 4.10.2014
- 21 KKJ. 2012. Verkkodokumentti. Maanmittauslaitos.  
<<http://www.maanmittauslaitos.fi/kartat/koordinaa.tit/tasokoordinaatistot/kkj>> Luettu 2.10.2014
- 22 JHS 163. 2007. Verkkodokumentti . Maanmittauslaitos. <<http://docs.jhs-suositukset.fi/jhs-suositukset/JHS163/JHS163.html>> Luettu 2.10.2014
- 23 3D Office paikallismuunnos. 2013. Topgeo Oy. Pdf-tiedosto.
- 24 X63/X63-i 3D Machine Control for Excavators. 2014. Verkkodokumentti. Topcon.  
<[http://www.topconpositioning.com/sites/default/files/X63\\_Broch\\_7010\\_0783\\_Revg\\_TF\\_sm.pdf](http://www.topconpositioning.com/sites/default/files/X63_Broch_7010_0783_Revg_TF_sm.pdf)> Luettu 26.8.2014
- 25 X63-i. 2014. Verkkodokumentti. Topcon.  
<<http://www.topconpositioning.com/products/machine-control/3d/x-63i>>



- 26 InfraRYL infrarakentamisen yleiset laatuvaatimukset. Rakennustietosäätiö RTS. Verkkodokumentti. <<https://www.rakennustieto.fi/infraryl/>> Luettu 26.9.2014

#### Haastattelut

- 27 Tuomaala, Janne. 2014. Maanmittausinsinööri, Mitta Oy. Sähköpostikeskustelu ajanjaksolla touko-lokakuu 2014.
- 28 Harju, Janne. 2014. Maanmittausinsinööri, Mitta Oy. Haastattelu tietomallikoordinaattorin toimenkuvasta Seinäjoella 24.4.2014
- 29 Mikkonen, Martti. 2014. Maanmittausteknikko, Mitta Oy. Sähköpostikeskustelu lokakuu 2014.
- 30 Mäki-Tulokas, Jouni. 2014. Toimitusjohtaja, Topgeo Oy. Haastattelu Topcon X63-i koneohjausjärjestelmän asentamisen yhteydessä 18-19.8.2014
- 31 Kråknäs, Pasi. 2014. Diplomi insinööri. VR Track. Sähköpostikeskustelu 12.11.2014.
- 32 Ilmonen, Mikko. 2014. Varatoimitusjohtaja, Mitta Oy. Haastattelu Lohjalla VT 25:n pohjaveden suojauksen työmaan tukiaseman pystyttämisen yhteydessä
- 33 Määttä, Teemu. 2014. Maanmittausinsinööri. Mitta Oy. Sähköpostikeskustelu marraskuu 2014.
- 34 Ilmonen, Mikko. 2015. Varatoimitusjohtaja, Mitta Oy. Sähköpostikeskustelu 11.1.2015.

#### Opetusvideot

- 35 Tietomallipohjainen koneohjaus. 12.3.2013. Opetusvideo. Verkkodokumentti. InfraBIM. <<http://www.infrabim.fi/tietomallipohjainen-koneohjaus/>> Katsottu 29.8.2014
- 36 Tietomallipohjainen tuotanto ja laadunvarmistus ratatyömaalla. 26.11.2013. Opetusvideo. Verkkodokumentti. Destia. <<https://www.youtube.com/watch?v=CBAXmFLlyOo>> Katsottu 29.8.2014

#### Kuvat

- 37 Novatronin valmistaman kaivinkoneen koneohjausjärjestelmän komponentit. 2013. Verkkodokumentti. Novatron. <<http://www.novatron.fi/fi/koneohjaus.html>>

- 38 Mäkelä, Harri. 2011. Miten tietomalli tulee muuttamaan urakoitsijoiden ja suunnittelijoiden tapaa toimia. Verkkodokumentti.  
<[http://www.rts.fi/infrabim/Tietomalli\\_muuttaa\\_toimintatavat.pdf](http://www.rts.fi/infrabim/Tietomalli_muuttaa_toimintatavat.pdf)>
- 39 Smartnet peittoalue. 2014. Verkkodokumentti. Leica. <[http://fi.smartnet-eu.com/peittoalue-kartta\\_19.htm](http://fi.smartnet-eu.com/peittoalue-kartta_19.htm)>
- 40 3D Modelling and machine control. 2013. Verkkodokumentti. 3D Survey Consultants. <[http://www.3dsurveyconsultants.com/?page\\_id=372](http://www.3dsurveyconsultants.com/?page_id=372)>
- 41 Painovoiman tasa-arvopinta. 2012. Verkkodokumentti. Wikipedia.  
<[http://fi.wikipedia.org/wiki/Geoidi#mediaviewer/File:Geoids\\_sm.jpg](http://fi.wikipedia.org/wiki/Geoidi#mediaviewer/File:Geoids_sm.jpg)>
- 42 TS-1 Tilt sensor. 2013. Verkkodokumentti. Topcon.  
<<http://www.topconpositioning.es/tienda/ocasion/control-de-maquinaria/topcon-ts-1-tilt-sensor.php>>
- 43 Kaivinkoneen rautalankamalli. 2008. Verkkodokumentti.  
<[http://th05.deviantart.net/fs17/PRE/f/2007/155/a/9/Cel\\_Excavator\\_Render\\_Test\\_3\\_by\\_Ulysses\\_31.jpg](http://th05.deviantart.net/fs17/PRE/f/2007/155/a/9/Cel_Excavator_Render_Test_3_by_Ulysses_31.jpg)>
- 44 Akkujen kytkennät. 2012. Verkkodokumentti.  
<<http://karavaanari.org/index.php?action=dlattach;topic=6487.0;attach=5553;image>>
- 45 Topcon X63-i-koneohjausjärjestelmän ohjelmiston kuvia. 2014. Topcon 3DMC simulaattorista otettuja kuvakaappauksia.

## Liite 1. JHS 184 -standardin ohjeistus staattiselle relatiiviselle GNSS-mittaukselle

Taulukko 3. Peruskäyntipisteiden (E3-E4) suunnittelun mittauksen ja laskennan kontrollointi.

| Suunnittelussa  | E3   | E4   |
|---|--|--|
| Lähtöpisteiden valinta  |  |  |
| Luokka  | E1-E2  | E1-E3  |
| Lukumäärä   | Vähintään kolme mittausalueen ulkopuolista pistettä. Mittausalueella tarkoitetaan määritettävien pisteiden rajaamaa aluetta verkossa.  |  |
| Mittausalueelta   | Vähintään E2-luokan pisteet  | Vähintään E3-luokan pisteet  |
| Etäisyys mittausalueen rajalta  | Enintään 100 km  |  |
| Sijainti  | Uloimmat lähtöpisteet sulkevat mitattavan alueen sisäänsä  |  |
| Kontrollipisteiden valinta (mikäli mittausalueella on ko. luokan pisteitä)                            |  |  |
| Luokka  | E3   | E4   |
| Lukumäärä<br>(N on määritettävien pisteiden lukumäärä)  | 3+0,2*N  | 2+0,2*N  |
| Sijainti  | Mittausalueelta ja korkeintaan 5 km etäisyydeltä mittausalueen reunoista   | Mittausalueelta ja korkeintaan 3 km etäisyydeltä mittausalueen reunoista   |
| Verkon rakenne  |  |  |
| Rakenne   | Kolmioverkko   | Monikulmioverkko   |
| Riippumattomien vektoreiden lukumäärä silmukassa  | 3  | 3-5  |
| Vektoreita jokaisesta lähtöpisteestä määritettäviin pisteisiin  | Vähintään 2  |  |
| Yhtä aikaa havaitsevien vastaanottimien lukumäärä määritettävillä kiintopisteillä                     | Vähintään 2  |  |
| Jononaisuus   | Kaikkien pisteiden sisällyttävä johonkin verkon silmukkaan (ei piikkipisteitä)   |  |
| Piste mukana vähintään kahdessa sessiossa   | Kyllä  |  |
| Yhteisiä pisteitä vierekkäisillä silmukoilla  | 2  | Vähintään 2  |
| Suositeltava pisteväli  | 4-10 km  | 0,5-5 km   |
| Toistettavien riippumattomien vektoreiden lukumäärä   | 15 % suunnitellun verkon vektoreista   |  |
| Vierekkäisten pisteiden välinen vektori mitattava suoraan   | Mitataan aina (kolmioverkko).  | Kyllä, jos pisteiden välillä näköyhteys tai jos etäisyys on alle 20 % muuta reittiä (mitattuja vektoreita) pitkin saatavasta etäisyydestä. |
| Havaintojaksojen suunnittelu  |  |  |
| Havaintojakson vähimmäispituus (taulukko 2)   | Pisimmän sessioon kuuluvan vektorin etäisyyden perusteella, kuitenkin vähintään 1 h.   |  |
| PDOP  | Enintään 5   |  |
| Satelliittien lukumäärä (75 % ajasta)   | Vähintään 5  |  |
| Havaintopaikan laatu (esteisyys)  | Mahdollisimman avoin korkeuskulman 15-20° yläpuolella. Vältettävä monitieheijastumista aiheuttavia olosuhteita.  |  |
| Maastossa   | E3   | E4   |
| Suositeltava havaintoväli   | 1,5,10,15 tai 30 s   |  |
| Aikaväli toistettaville vektoreille vähintään   | 60 min   |  |
| Antennin keskitys ja korkeuden mittaus  | Keskitys ja korkeuden mittaus 1 mm:n tarkkuudella. Joka sessioon jokaiselle pisteelle oma keskitys, jossa myös jalusta pystytetään uudelleen. Tasain ja luoti tarkistetaan säännöllisesti. |  |
| Antennin korkeuden mittaus ja keskityksen tarkistus   | Ennen ja jälkeen havaintojakson  |  |
| Poikkeama antennin korkeuden mittauksessa enintään  | 3 mm   |  |
| Korkeuskulmamaski havaitaessa (vastaanottimessa)  | 5 astetta  |  |
| Jälkikäsitellessä   | E3   | E4   |
| Verkon laskenta yhtenä tasoituksena   | Kyllä  |  |
| Havaintojen katkaisukulma laskennassa   | 10-20 astetta  |  |
| Alkutuotemattomien ratkaisu vektorilaskennassa  | Vain fix-ratkaisut hyväksytään   |  |
| Radat   | Tarkat (satelliittien lähettämät kelpaavat, jos kaikki vektorit alle 10 km)  |  |
| Vektorilaskennassa käytettyjen koordinaattien likiarvojen poikkeama lopullisista enintään             | 10 m<br>(liikarvon tarkkuudeksi riittää navigointiratkaisusta saatava koordinaattiarvo)  |  |
| Pisteiden enimmäislukumäärä silmukoiden sulkuvirheanalyysissä   | 4  | 6  |
| Silmukan enimmäispituus sulkuvirheanalyysissä   | 40 km  | 30 km  |
| Pistesulkuvirhe enintään  | 60 mm  | 75 mm  |
| Suurin sallittu standardisoitu residuaali vapaan verkon tasoituksessa                                 | 2.8 (ks. liite 2)  |  |
| Suurin sallittu ero kahteen kertaan havaittujen vektoreiden osalta                                    | 70 mm (3D)<br>28 mm (taso),<br>56 mm (korkeus)   | 75 mm (3D)<br>30 mm (taso),<br>60 mm (korkeus)   |
| Suurin sallittu ero kontrollipisteen (saman luokan piste) koordinaattien ja uuden määrittelyn välillä | 25 mm (taso),<br>50 mm (korkeus)   | 33 mm (taso),<br>50 mm (korkeus)   |
| Vapaan verkon (yksi piste lähtöpisteenä) ja kiinnitetyn verkon tasoitusten koordinaattiero            | Alle 25 mm (maannousumallin käyttö voi auttaa)   |  |
| Maannousu huomioitava, jos verkon koko yli 200 km   | Kyllä  |  |

Taulukko 4. Käyttökiintopisteiden (E5-E6) mittaaminen staattisella GNSS-mittauksella.

| Suunnittelussa   | E5  | E6        |
|--|---|-----------|
| <b>Lähtöpisteiden valinta</b>  |   |           |
| Luokka, vähintään  | E4  | E5        |
| Lukumäärä  | Vähintään kolme   |           |
| Etäisyys mitta-alueen rajalta  | Enintään 100 km   |           |
| Sijainti   | Mitta-alueelta tai sen ulkopuolelta   |           |
| <b>Kontrollipisteiden valinta (mikäli mitta-alueella on ko. luokan pisteitä)</b>           |   |           |
| Luokka   | E5  | E6        |
| Lukumäärä  | Vähintään yksi piste / mitta-alue   |           |
| Sijainti   | Mitta-alueelta tai korkeintaan 1 km:n etäisyydeltä mitta-alueen reunoista                                       |           |
| <b>Verkon rakenne</b>  |   |           |
| Yhtä aikaa havaitsevien vastaanottimien lukumäärä määritettävillä kiintopisteillä          | Vähintään 1   |           |
| Suositeltava pisteväli   | 100–500 m   |           |
| Vierekkäisten pisteiden välinen vektori mitattava suoraan                                  | Kyllä, jos etäisyys alle 500 m ja suositeltavaa, jos pisteiden välillä näköyhteys.                              |           |
| <b>Havaintojaksojen suunnittelu</b>  |   |           |
| Havaintojakson vähimmäispituus (taulukko 2)  | Pisimmän sessioon kuuluvan vektorin etäisyyden perusteella, kuitenkin vähintään 30 min.                         |           |
| PDOP   | Enintään 5  |           |
| Satelliittien lukumäärä (75 % ajasta)  | Vähintään 5   |           |
| Havaintopaikan laatu (esteisyys)   | Mahdollisimman avoin korkeuskulman 15–20° yläpuolella. Vältettävä monitieheijastumista aiheuttavia olosuhteita. |           |
| <b>Maastossa</b>   | <b>E5</b>   | <b>E6</b> |
| Suositeltava havaintoväli  | 1,5,10,15 tai 30 s  |           |
| Antennin keskistys ja korkeuden mitta  | Keskistys ja korkeuden mitta 1 mm:n tarkkuudella. Tasain ja luoti tarkistetaan säännöllisesti.                  |           |
| Antennin korkeuden mitta ja keskityksen tarkistus  | Ennen ja jälkeen havaintojakson   |           |
| Poikkeama antennin korkeuden mittauksessa enintään   | 3 mm  |           |
| Korkeuskulmamaski havaittaessa (vastaanottimessa)  | 5 astetta   |           |
| <b>Jälkikäsittelyssä</b>   | <b>E5</b>   | <b>E6</b> |
| Havaintojen katkaisukulma laskennassa  | 10–20 astetta   |           |
| Alkutuntemattomien ratkaisu vektorilaskennassa   | Vain fix-ratkaisut hyväksytään  |           |
| Radat  | Tarkat (satelliittien lähettämät kelpaavat, jos kaikki vektorit alle 10 km)                                     |           |
| Vektorilaskennassa käytettyjen koordinaattien likiarvojen poikkeama lopullisista enintään  | 10 m<br>(liikarvon tarkkuudeksi riittää navigointiratkaisusta saatava koordinaattiarvo)                         |           |
| Ero kontrollipisteiden koordinaatteihin komponenteittain                                   | N,E: 40 mm<br>h: 70 mm  |           |
| Vapaan verkon (yksi piste lähtöpisteenä) ja kiinnitetyn verkon tasoitusten koordinaattiero | Alle 25 mm (maannousumallin käyttö voi auttaa)  |           |

|      |  |  |
|------|--|--|
| Kone |  |  |
|------|--|--|

[illegible]



**Liite 3. N60- ja N2000-korkeusjärjestelmien välinen korkeusero Suomessa**



